Н. П. ЕРМОЛИН.

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Н. П. ЕРМОЛИН

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Издание второе, переработанное и исправленное



«ЭНЕРГИЯ»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1969

УДК 621.314.22.0 ` 04
6П2.1.08
Е 74

Ермолин Н. П.

Е 74 Расчет трансформаторов малой мощности. «Энергия», Л., 1969.

192 с. с рис.

В книге рассматриваются современные проблемы в области проектирования малых трансформаторов в диапазоне мощностей до нескольких сотен вольт-ампер, дается характеристика новых материалов в трансформаторостроении, излагается систематизированная методика расчета силовых однофазных и трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов малой мощности с учетом современных требований, а также дается расчет пиковых и импульсных трансформаторов.

Книга предназначается для специалистов, занимающихся проектированием и производством трансформаторов малой мощности для радиоэлектронной аппаратуры, установок связи, автоматических устройств, летательных аппаратов, а также для студентов втузов.

3-3-10
147-70

6П2.1.08

ПРЕДИСЛОВИЕ

За период с момента выхода в свет первого издания книги (1957 г.) и до настоящего времени теория и расчет трансформаторов малой мощности в пределах до нескольких сотен вольт-ампер получили свое дальнейшее уточнение и развитие. За это же время появилось много новых материалов, применяемых в современном трансформаторостроении. В настоящее время трансформаторы малой мощности получили широкое и разнообразное применение в различных областях новой техники — в радиоэлектронной аппаратуре, установках связи, автоматических устройствах, летательных аппаратах и других областях.

При организации массового производства и выпуска трансформаторов малой мощности возникает много проблем в области оптимального проектирования таких трансформаторов для разного назначения, с целью получения технически и экономически обоснованных рациональных габаритных, весовых и других показателей. В связи с этим во втором издании настоящей книги получили свое отражение современные вопросы оптимального проектирования, новые материалы и другие проблемы малых трансформаторов. Общая структура второго издания данной книги в основном совпадает с первым изданием. Книга включает в себя рассмотрение современных проблем в области проектирования малых трансформаторов, характеристику новых материалов, изложение методики расчета силовых однофазных и трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов с учетом современных требований, с соответствующими числовыми примерами, а также методику расчета пиковых и импульсных трансформаторов с необходимыми числовыми примерами.

В отличие от первого издания книги для количественной оценки различных электрических, магнитных и

тепловых величин в данной книге применяется как предпочтительная Международная система единиц СИ по ГОСТу 9867—61. Основными единицами этой системы являются: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина и свеча. Однако в целях удобства измерения некоторых величин Международная система единиц и указанный Государственный стандарт предусматривают также использование на практике кратных и дольных единиц, образуемых умножением или делением основных или производных единиц на степень числа 10.

Так как в данной книге рассматриваются трансформаторы малой мощности в диапазоне мощностей до нескольких сотен вольт-ампер, то габаритные размеры их обычно измеряются величинами порядка нескольких сантиметров или немногим более, а отдельные их детали — долями сантиметра. Поэтому в целях практического удобства для измерения линейных размеров и ряда других величин этих трансформаторов целесообразно использовать допускаемые Государственным стандартом дольные единицы длины. Так, например, в качестве дольных единиц длины в книге приняты: для измерения размеров и некоторых других величин рассматриваемых трансформаторов — 1 *см* $= 1 \cdot 10^{-2}$ *м*, а для размеров обмоточных проводов, толщины изоляции и других малых величин — 1 *мм* $= 1 \cdot 10^{-3}$ *м*. Кроме того, в книге сохранена также внесистемная единица по ГОСТу 7664—61 для измерения температуры трансформатора — градус Цельсия (°С).

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в многочисленных современных устройствах радиоэлектроники, в автоматике, установках связи, летательных аппаратах и других областях новой техники широкое и разнообразное применение получили малые силовые однофазные и трехфазные трансформаторы и автотрансформаторы в диапазоне мощностей от единиц до нескольких сотен вольт-ампер и специальные пиковые и импульсные трансформаторы малой мощности.

Автотрансформатор отличается от трансформатора тем, что он имеет одну обмотку, часть которой одновременно принадлежит первичной и вторичной цепям (рис. 22). Основным назначением силовых трансформаторов и автотрансформаторов малой мощности в указанных радио- и электронных устройствах является питание накальных и анодных цепей и других элементов этих устройств.

Под пиковым трансформатором понимается специальный тип трансформатора, который служит для преобразования первичного напряжения синусоидальной формы во вторичное напряжение с крутым фронтом волны в виде пика (рис. 27 — 29). Эти трансформаторы получили практическое применение в автоматических устройствах и установках с тиратронами и ртутными выпрямителями, снабженными регулирующими сетками. Их назначением является зажигание этих приборов и регулирование величины выпрямляемого приборами тока.

Импульсный трансформатор также представляет собой специальный тип трансформатора, который служит для трансформации кратковременных импульсов напряжения приблизительно прямоугольной формы длительностью порядка 1 — 2 *мксек* и меньше, периодически повторяющихся с частотой примерно 500—2000 *гц* и более. Эти трансформаторы находят широкое

применение в технике радиолокации, телевидения и импульсной радиосвязи. С их помощью в этих областях техники осуществляется повышение амплитуды импульса напряжения, изменение полярности импульса и межкаскадная связь в усилителях.

Производство и выпуск перечисленных выше малых трансформаторов в разных странах, в том числе и в Советском Союзе, характеризуется многими миллионами штук в год. Это связано с огромным расходом активных материалов — листовой электротехнической стали, меди, алюминия и изоляционных материалов — на производство таких трансформаторов. При организации массового производства и выпуска малых трансформаторов возникает задача оптимального проектирования этих трансформаторов для разного назначения для получения технически и экономически обоснованных рациональных габаритных, весовых и других показателей.

Понятие оптимальности трансформатора малой мощности обычно определяется в зависимости от назначения этого трансформатора и характеризуется наивыгоднейшими технико-экономическими показателями. Под технико-экономическими показателями трансформатора понимаются вес (масса), объем или стоимость его, приходящиеся на единицу мощности, а также характеристика его качества — надежность.

Под надежностью трансформатора понимается способность его безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного времени и при определенных условиях применения. Следовательно, надежность трансформатора характеризуется вероятностью безотказной работы его в течение заданного времени. Надежность трансформатора имеет для практики такое же значение, как и его рабочие характеристики. Мерой надежности трансформатора является интенсивность отказов в работе в единицу времени. Под отказом в теории надежности понимается событие, после возникновения которого изделие утрачивает способность выполнять заданные функции. Так, при отсутствии отказов в работе в течение определенного времени трансформатор обладает стопроцентной надежностью, при частых отказах он ненадежен. Вообще хорошо спроектированный, тщательно изготовленный,

испытанный и правильно эксплуатируемый трансформатор не должен отказывать в работе в течение заданного срока службы. Однако опыт показывает, что даже наилучшие конструкции трансформаторов, совершенная технология их изготовления и правильная эксплуатация не исключают полностью возникновения отказов в работе.

В отношении других технико-экономических показателей трансформатор может быть спроектирован оптимальным или по наименьшему удельному весу (удельной массе), или по наименьшему удельному объему, или по наименьшей удельной стоимости, или же по рациональному сочетанию любых двух или трех из этих параметров. Особенно важными являются вопросы оптимальности при проектировании силовых трансформаторов малой мощности, работающих в разнообразных условиях применения, различных режимах нагрузки и определенных заданных значениях падения напряжения в обмотках или превышения температуры нагрева их.

Проблема оптимального проектирования трансформаторов малой мощности в принципе сводится к поиску минимальных значений упомянутых выше технико-экономических показателей при заданных параметрах и условиях применения трансформатора.

Как показывают исследования, проделанные Р. Х. Бальяном в его докторской диссертации „Вопросы оптимального проектирования трансформаторов малой мощности общего и специального назначения", оптимальные технико-экономические показатели силовых трансформаторов малой мощности тесно связаны с оптимальными соотношениями геометрических размеров сердечника трансформатора — ширины и толщины стержня и размеров окна (рис. 1, 2 и 3). По данным этих исследований, проведенных с помощью электронной цифровой вычислительной машины, оптимальные соотношения геометрических размеров для разных типов малых силовых трансформаторов — однофазных броневых, стержневых, тороидальных и трехфазных — оказываются различными для получения минимальных значений удельного веса (массы), объема или стоимости трансформатора.

Вместе с этим следует отметить, что в ряде областей техники, в которых эти трансформаторы получили

широкое применение, к ним предъявляются также высокие требования в отношении теплостойкости. Под теплостойкими силовыми трансформаторами малой мощности понимаются трансформаторы, которые могут работать с высокой надежностью при температурах нагрева их до 250—300° С. Создание таких трансформаторов возможно только при условии применения новых теплостойких изоляционных и обмоточных материалов и подходящих магнитных материалов. В этом случае важное значение имеет правильный выбор оптимальных геометрических размеров трансформаторов. При работе теплостойких трансформаторов могут встречаться разные случаи теплового режима внешней окружающей среды: режим нормальной температуры этой среды и режим высокой температуры ее. В первом случае высокая температура нагрева теплостойкого трансформатора получается за счет его собственных потерь вследствие высокого использования активных материалов; во втором случае эта температура достигается в основном за счет высокой температуры окружающей среды. Последние условия наблюдаются, например, при работе трансформаторов в летательных аппаратах, ускорительных установках и в ряде других случаев. При проектировании теплостойкого трансформатора минимального веса (массы) нужно обеспечить в нем условия оптимального теплового режима работы. Под этим режимом понимается полная загрузка обмотки и сердечника в тепловом отношении, при которой они в установившемся режиме имеют предельно допустимую температуру нагрева по условиям теплостойкости изоляции обмотки.

В связи с этим расчет силовых трансформаторов и автотрансформаторов, в особенности расчет пиковых и импульсных трансформаторов, несколько отличается от порядка расчета обыкновенных трансформаторов большой мощности. Настоящая книга имеет своей целью дать систематизированный расчет малых силовых однофазных и трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов в диапазоне мощностей от единиц до нескольких сотен вольт-ампер и специальных пиковых и импульсных трансформаторов малой мощности.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ВОПРОСЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Проектирование трансформаторов слагается из расчета и конструирования их. Расчет трансформатора в общем представляет собой математически неопределенную задачу со многими решениями, так как число определяемых неизвестных больше числа уравнений, связывающих их. Вследствие этого в процессе расчета трансформатора приходится задаваться определенными значениями некоторых исходных электромагнитных и конструктивных величин, базируясь на опыте построенных трансформаторов. В связи с этим при проектировании нового трансформатора обычно получается несколько расчетных вариантов его, из которых и выбирается наивыгоднейший.

При проектировании трансформаторов малой мощности различного назначения в диапазоне мощностей от единиц до нескольких сотен вольт-ампер приходится определять основные геометрические размеры и другие параметры трансформатора применительно к разным техническим требованиям по заданию. Так, например, в задании на проектирование силовых трансформаторов малой мощности в указанном диапазоне мощностей на практике может встречаться одно из следующих требований: предельное допустимое падение напряжения в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке, заданное превышение температуры нагрева их и т. д.

Задание предельного допустимого падения напряжения $\Delta U\%$ в малых трансформаторах при нагрузке необходимо для обеспечения определенной стабильности напряжения вторичных обмоток при изменении нагрузки и условий работы трансформатора. Как показывает опыт, допустимая величина $\Delta U\%$ в этом случае не

должна превышать 5—10%, что достигается снижением плотности тока в обмотках трансформатора. При отсутствии определенных требований в отношении стабильности выходных напряжений силового трансформатора малой мощности эта величина может составлять 15—20% или более.

Как известно, общее падение напряжения $\Delta U\%$ в трансформаторах при нагрузке слагается из активной и индуктивной составляющих. В силовых трансформаторах малой мощности в диапазоне мощностей от единиц до нескольких сотен вольт-ампер главной составляющей является активное падение напряжения. Индуктивное падение напряжения значительно меньше активного, и во многих случаях им можно пренебречь, в особенности при самых малых мощностях, так как активное падение напряжения в обмотках малого силового трансформатора с уменьшением его мощности относительно возрастает, а индуктивное — уменьшается. Однако при заданной мощности трансформатора активное падение напряжения в нем уменьшается с повышением частоты питающего напряжения. Это обусловливается уменьшением числа витков обмоток трансформатора при повышенной частоте.

Что касается задания допустимого превышения температуры нагрева обмоток силовых трансформаторов малой мощности при их проектировании, то оно зависит от назначения трансформаторов и условий их применения. Как известно, наивысшая допустимая температура нагрева обмоток трансформатора зависит от класса изоляции их. При изоляции обмоток класса *А* допустимое превышение температуры нагрева их θ_m не должно превосходить 60—65° С при наибольшей температуре окружающей среды +40° С. Следовательно, при указанном классе изоляции обмоток температура нагрева их не должна быть более 105° С. В теплостойких силовых трансформаторах малой мощности с изоляцией обмоток из специальных теплостойких материалов температура нагрева трансформатора может достигать 250—300° С. Эти трансформаторы применяются, например, в радиоэлектронной аппаратуре летательных аппаратов, в которых температура окружающей среды может изменяться в пределах от —60° С до +150° С и выше.

Важным фактором в силовых трансформаторах малой мощности является намагничивающий ток. Он составляет в них относительно большую величину, нередко достигающую 80—90% значения первичного рабочего тока трансформатора. С уменьшением мощности трансформатора при данной частоте питающего напряжения этот ток относительно возрастает, а с повышением этой частоты при заданной мощности трансформатора он уменьшается. Допустимая величина намагничивающего тока обычно обеспечивается надлежащим выбором индукции в сердечнике трансформатора.

Во всех случаях проектирования малых силовых трансформаторов следует учитывать также требования оптимальности проектируемого трансформатора по определенным технико-экономическим показателям. При этом понятие оптимальности трансформатора определяется в зависимости от его назначения. Как указывалось выше, трансформатор может быть оптимальным по одному из следующих технико-экономических показателей — по наименьшей удельной массе, объему или же стоимости активных материалов. При этом под активными материалами трансформатора понимаются листовая электротехническая сталь для сердечника и обмоточные провода для катушек.

Под удельными технико-экономическими показателями для трансформаторов малой мощности понимаются следующие величины [7]:

$$g=\frac{G}{P}\ [кг/ва];\qquad v=\frac{V}{P}\ [см^3/ва];\qquad k=\frac{K}{P}\ [руб/ва],\quad (1)$$

где G — масса активных материалов трансформатора, *кг*; V — габаритный объем активных материалов его, *см*^{3}; K — стоимость активных материалов, руб.; $P=mE'_2I'_2$ — электромагнитная, или полезная мощность силового трансформатора, *ва*.

При этом фазная э. д. с., приходящаяся на один обмотанный стержень,

$$E'_2=E_1=4{,}44f_1W_1k_3S_cB\cdot 10^{-4}\quad [в];\qquad (2)$$

приведенный к числу витков первичной обмотки вторичный ток

$$I'_2=jq_1;\qquad (3)$$

число фаз трансформатора:

$m=1$ — для однофазных броневых и однокатушечных стержневых трансформаторов (рис. 1 и 6, *б*);

$m=2$ — для однофазных двухкатушечных стержневых трансформаторов (рис. 2 и 6, *а*);

$m=3$ — для трехфазных стержневых трансформаторов (рис. 3 и 7).

Значения величин в уравнениях (2) и (3) следующие: f_1 — частота питающей сети, *гц*; W_1 — число витков первичной обмотки, приходящихся на один обмотанный стержень; q_1 — поперечное сечение провода первичной обмотки, *мм*²; B — магнитная индукция в стержне сердечника, *тл*; j — плотность тока в проводе первичной обмотки, *а/мм*²; $k_з$ — коэффициент заполнения сечения стержня сталью; $S_с=ab$ — геометрическое поперечное сечение стержня сердечника, *см*²; a — ширина стержня, *см*; b — толщина пакета стержня, *см*.

Электромагнитная, или полезная мощность трансформатора с учетом уравнений (1), (2) и (3)

$$P=4{,}44 m f_1 W_1 q_1 k_з S_с j B \cdot 10^{-4} \quad [ва].$$

При этом практически можно считать, что

$$W_1 q_1 \approx \frac{k_{ок} S_{ок} \cdot 10^2}{2} \quad [мм^2],$$

где $k_{ок}$ — коэффициент заполнения окна сердечника трансформатора проводниковым материалом; $S_{ок}$ — геометрическая площадь окна этого сердечника, приходящаяся на одну фазу или один обмотанный стержень, *см*². Здесь $S_{ок}=cH/2$ — для однофазных и трехфазных стержневых трансформаторов (рис. 2, 3, 6, *а* и 7); $S_{ок}=cH$ — для однофазных броневых и однокатушечных стержневых трансформаторов (рис. 1, 5 и 6); c — ширина окна сердечника, *см*; H — высота его, *см*.

Следовательно, электромагнитная, или полезная мощность трансформатора [7]

$$P=2{,}22 m f_1 k_з k_{ок} S_с S_{ок} j B \cdot 10^{-2} \quad [ва]. \qquad (4)$$

Как показывает уравнение (4), электромагнитная, или полезная мощность P силового трансформатора при постоянных значениях плотности тока j в обмотках и индукции B в стержнях пропорциональна произведению площадей поперечного сечения стержня и окна транс-

форматора $S_c S_{ок}$, а при постоянном значении произведения $S_c S_{ок}$ эта мощность пропорциональна частоте питающего напряжения f_1. Следовательно, при заданной мощности P габариты и масса трансформатора уменьшаются с увеличением частоты f_1, поэтому в летательных аппаратах целесообразно применение повышенной частоты. Обычно стандартными частотами питающего напряжения являются 400, 1000 и более герц.

Выбор величины индукции B в стержнях сердечника и плотности тока j в обмотках трансформатора производится в зависимости от заданных условий режима его работы — температуры нагрева и материала обмоток, величины падения напряжения в них или же допустимого намагничивающего тока.

Из указанных выше технико-экономических показателей силовых трансформаторов малой мощности величины массы G и объема V имеют важное значение главным образом в трансформаторах для аппаратуры специального назначения, применяемой в военной технике, летательных аппаратах и некоторых других областях. Показатель стоимости K трансформатора имеет большое значение для бытовой радиоаппаратуры.

Габаритный объем V активных материалов трансформатора, т. е. листовой стали сердечника и проводникового материала катушек (меди и алюминия), можно представить в следующем виде:

$$V = V_c + V_к \quad [см^3], \tag{5}$$

где V_c — объем стали сердечника трансформатора, $см^3$; $V_к$ — объем катушек обмоток его, $см^3$.

Величины этих объемов зависят от типа трансформатора и могут быть представлены в зависимости от ширины стержня сердечника a, принимаемой обычно за базовый размер трансформатора (рис. 1, 2 и 3). Для удобства анализа технико-экономических показателей трансформаторов малой мощности можно выразить все размеры сердечника и катушек обмоток их в долях базового размера a, положив [7]

$$x = \frac{c}{a}; \quad y = \frac{b}{a}; \quad z = \frac{H}{a}. \tag{6а}$$

Тогда объемы сердечника и катушек обмоток трансформатора будут равны:

а) для однофазного броневого трансформатора (рис. 1)

$$V_с = 2a^3y(x+z+1)\ [см^3];\ V_к = 2a^3xz(2x+y+1)\ [см^3]; \quad (6б)$$

б) для однофазного двухкатушечного стержневого трансформатора (рис. 2)

$$V_с = 2a^3y(x+z+2)\ [см^3];\ V_к = 2a^3xz(x+y+1)\ [см^3]; \quad (6в)$$

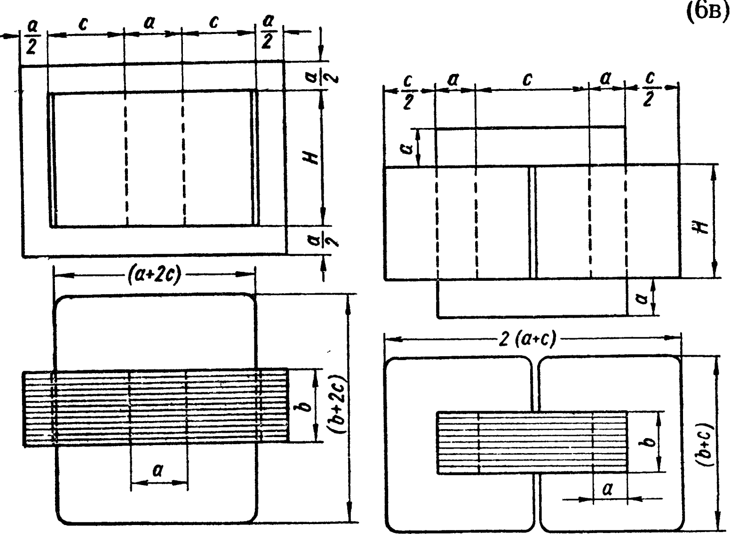


Рис. 1. Габаритные размеры однофазного броневого трансформатора.

Рис. 2. Габаритные размеры однофазного стержневого трансформатора.

в) для трехфазного стержневого трансформатора (рис. 3)

$$V_с = a^3y(4x+3z+6)\ [см^3];\ V_к = 3a^3xz(x+y+1)\ [см^3]. \quad (6г)$$

В объем катушек $V_к$ здесь входит только проводниковый материал с изоляцией без объема пространства, занимаемого обмотанными стержнями внутри катушек.

Масса активных материалов малого трансформатора может быть представлена в следующем виде [7]:

$$G = (k_з\gamma_сV_с + k_{ок}\gamma_мV_к)\cdot 10^{-3} = k_з\gamma_с(V_с + a_gV_к)\cdot 10^{-3}\ [кг], \quad (7)$$

где $a_g = \frac{k_{ок}}{k_з} \cdot \frac{\gamma_м}{\gamma_с}$; $\gamma_с = 7{,}6$ — удельная масса стали сердечника, *г/см³*; $\gamma_м = 8{,}9$ — удельная масса меди обмотки, *г/см³* (для алюминия $\gamma_м = 2{,}7$ *г/см³*); $k_{ок} = 0{,}20 \div 0{,}40$ — коэффициент заполнения окна трансформатора материалом обмотки из круглого провода; в среднем можно принять $k_{ок} \approx 0{,}26$ (для алюминиевой обмотки из фольги в среднем $k_{ок} \approx 0{,}52$); $k_з = 0{,}86 \div 0{,}94$ — коэффициент заполнения сечения сердечника сталью при лаковой изоляции и толщине листов $0{,}20 \div 0{,}50$ *мм*; в среднем можно принять $k_з \approx 0{,}90$. Тогда в среднем коэффициент a_g в уравнении (7) будет равен:

а) для медной обмотки из круглого провода

$$a_g = \frac{0{,}26}{0{,}90} \cdot \frac{8{,}9}{7{,}6} \approx 0{,}34;$$

б) для алюминиевой обмотки из круглого провода

$$a_g = \frac{0{,}26}{0{,}90} \cdot \frac{2{,}7}{7{,}6} \approx 0{,}10;$$

в) для алюминиевой обмотки из фольги

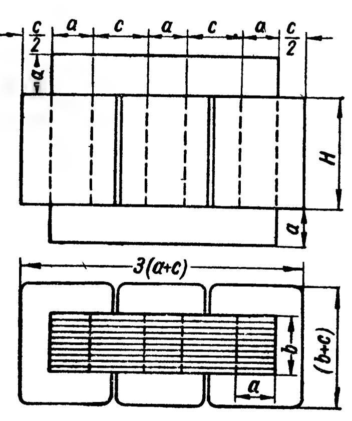


Рис. 3. Габаритные размеры трехфазного стержневого трансформатора.

$$a_g = \frac{0{,}52}{0{,}90} \cdot \frac{2{,}7}{7{,}6} \approx 0{,}20.$$

Стоимость активных материалов малого трансформатора [7]

$$K = k_з \gamma_с \beta_с (V_с + a_к V_к) \cdot 10^{-3} \ [руб], \tag{8}$$

где $a_к = \frac{k_{ок}}{k_з} \frac{\gamma_м}{\gamma_с} \cdot \frac{\beta_м}{\beta_с}$; $\beta_с$ и $\beta_м$ — стоимость одного килограмма листовой стали и материала обмоток соответственно, *руб/кг*.

Следует отметить, что отношение стоимости проводникового материала обмоток к стоимости листового материала сердечника $\frac{\beta_м}{\beta_с}$ изменяется в широких пределах в зависимости от диаметра и марки проводов, толщины листов и марки стали. Это отношение тем

больше, чем меньше диаметр обмоточного провода, так как стоимость этого провода с уменьшением его диаметра возрастает. Стоимость алюминиевых круглых обмоточных проводов значительно выше стоимости медных проводов тех же диаметров и марок изоляции. В особенности велико различие в стоимости для малых сечений проводов. Так, например, при диаметрах обмоточных проводов 0,10 ÷ 0,25 *мм* с изоляцией из высокопрочной эмали стоимость алюминиевых проводов (марки ПЭВА) по прейскуранту оптовых цен[1] в 3,7 ÷ ÷ 2,3 раза выше стоимости медных (марки ПЭВ-2). С увеличением диаметра провода это различие уменьшается, но всё же алюминиевые провода дороже медных.

При применении в силовых трансформаторах алюминиевых катушек из круглого провода следует иметь в виду, что для сохранения активного сопротивления обмоток и потерь энергии в них в заданных пределах поперечное сечение алюминиевого провода ири прочих равных условиях должно быть больше медного в 1,7 раза и, следовательно, плотность тока в алюминиевом проводе при данной мощности трансформатора будет примерно в 1,7 раза меньше. При этом условии различие в стоимости алюминиевых и медных проводов несколько уменьшается. Так, например, номинальным диаметрам медных проводов в диапазоне 0,10 ÷ 0,25 *мм* соответствуют диаметры алюминиевых проводов 0,13 ÷ ÷ 0,31 *мм*, стоимость которых относительно меньше, чем при диаметрах 0,10 ÷ 0,25 *мм*. В диапазоне номинальных диаметров медных проводов от 0,10 до 1,0 *мм* и соответственно диаметров алюминиевых от 0,13 до 1,3 *мм* стоимость 1 *кг* алюминиевых проводов с изоляцией из высокопрочной эмали (марки ПЭВА) по прейскуранту в среднем примерно в 2 раза выше стоимости 1 *кг* медных проводов той же марки изоляции (марка ПЭВ-2). Стоимость медных проводов диаметром 0,10 ÷ ÷ 1,0 *мм* с теплостойкой изоляцией марки ПЭТВ на 10—20% выше и марки ПЭТСОТ (диаметром 0,33 ÷ ÷ 1,0 *мм*) в 2-3 раза выше стоимости проводов марки ПЭВ-2. Как указывалось выше, стоимость обмоточных проводов в значительной степени зависит от их диаметра.

---

[1] Прейскурант № 15—09. Оптовые цены на кабельные изделия. Прейскурантгиз, 1967.

Чем меньше этот диаметр, тем выше стоимость проводов. Так, например, по прейскуранту оптовых цен на кабельные изделия[1] стоимость 1 *кг* обмоточного провода с изоляцией из высокопрочной эмали марок ПЭВ-2 и ПЭВА в среднем составляет:

а) для медных проводов марки ПЭВ-2

при диаметрах 0,10 ÷ 0,25 *мм* $\beta_м = 4{,}0$ *руб/кг*;

при диаметрах 0,27 ÷ 0,62 *мм* $\beta_м \approx 1{,}8$ *руб/кг*;

при диаметрах 0,64 ÷ 1,0 *мм* $\beta_м \approx 1{,}4$ *руб/кг*;

в среднем $\beta_м \approx 2{,}2 \div 2{,}6$ *руб/кг*;

б) для алюминиевых проводов соответственно в 1,7 раза большего сечения марки ПЭВА

при диаметрах 0,13 ÷ 0,31 *мм* $\beta_м \approx 9{,}6$ *руб/кг*;

при диаметрах 0,33 ÷ 0,80 *мм* $\beta_м \approx 2{,}8$ *руб/кг*;

при диаметрах 0,64 ÷ 1,30 *мм* $\beta_м \approx 1{,}8$ *руб/кг*;

в среднем $\beta_м \approx 4{,}6 \div 5{,}0$ *руб/кг*.

Стоимость 1 *кг* листовой электротехнической стали для сердечников трансформаторов по прейскуранту в зависимости от марки стали в среднем составляет:

а) для горячекатаной стали

марок Э11 и Э12 толщиной 0,5 *мм* $\beta_с = 0{,}22$ *руб/кг*;

марок Э41 и Э42 толщиной 0,35 *мм* $\beta_с = 0{,}32$ *руб/кг*;

марки Э44 толщиной 0,2 *мм* $\beta_с = 0{,}52$ *руб/кг*;

б) для холоднокатаной стали

марок Э310 и Э330 толщиной 0,35 *мм* $\beta_с = 0{,}70$ *руб/кг*;

в) для пермаллоя

марки 50Н толщиной 0,2 *мм* $\beta_с = 4{,}66$ *руб/кг*; толщиной 0,35 *мм* $\beta_с = 4{,}46$ *руб/кг*;

марки 79НМ толщиной 0,2 *мм* $\beta_с = 7{,}58$ *руб/кг*; толщиной 0,35 *мм* $\beta_с = 7{,}32$ *руб/кг*.

Таким образом, отношение стоимости проводникового материала обмоток $\beta_м$ силовых трансформаторов малой мощности к стоимости листового материала сердечника $\beta_с$ будет примерно составлять: для материала сердечника — сталь Э11 и Э12; при медных обмотках из круглого провода $\frac{\beta_м}{\beta_с} = \frac{2{,}4}{0{,}22} \approx 11$; при алюминиевых обмотках из круглого провода $\frac{\beta_м}{\beta_с} = \frac{4{,}8}{0{,}22} \approx 22$;

сталь Э41 и Э42 $\frac{2{,}4}{0{,}32} \approx 7{,}5$; $\frac{4{,}8}{0{,}32} \approx 15$;

[1] Прейскурант № 15—09. Оптовые цены на кабельные изделия. Прейскурантгиз, 1967.

сталь Э44	$\frac{2,4}{0,52} \approx 4,5;$	$\frac{4,8}{0,52} \approx 9;$
сталь Э310 и Э330	$\frac{2,4}{0,70} \approx 3,5;$	$\frac{4,8}{0,70} \approx 7;$
пермаллой 50Н	$\frac{2,4}{4,5} \approx 0,5;$	$\frac{4,8}{4,5} \approx 1,0;$
пермаллой 79НМ	$\frac{2,4}{7,4} \approx 0,3;$	$\frac{4,8}{7,4} \approx 0,6.$

При проектировании силовых трансформаторов малой мощности отношение $\frac{\beta_м}{\beta_с}$ в большинстве случаев в среднем можно принять следующим:

а) при сердечнике из горячекатаной стали для медной обмотки из круглого провода $\frac{\beta_м}{\beta_с} \approx 6$, для алюминиевой обмотки из круглого провода $\frac{\beta_м}{\beta_с} \approx 12$;

б) при сердечнике из холоднокатаной стали для медной обмотки $\frac{\beta_м}{\beta_с} \approx 3,5$, для алюминиевой обмотки $\frac{\beta_м}{\beta_с} = 7,0$.

Коэффициент a_k в уравнении (8) для указанных отношений принимает следующие значения:

а) при сердечнике из горячекатаной стали для медной обмотки из круглого провода $a_k = a_g \frac{\beta_м}{\beta_с} = 0,34 \cdot 6 \approx 2$; для алюминиевой обмотки из круглого провода $a_k = 0,10 \cdot 12 = 1,2$;

б) при сердечнике из холоднокатаной стали для медной обмотки $a_k = 0,34 \cdot 3,4 = 1,1$, для алюминиевой обмотки $a_k = 0,10 \cdot 7 = 0,7$.

Удельные технико-экономические показатели малых силовых трансформаторов по активным материалам с учетом уравнений (4), (5), (7) и (8)

$$g = \frac{G}{P} = \frac{0,1\gamma_с (V_с + a_g V_к)}{2,22 m f_1 k_{ок} S_с S_{ок} jB} \ [кг/ва]; \tag{9а}$$

$$v = \frac{V}{P} = \frac{(V_с + V_к) \cdot 10^2}{2,22 m f_1 k_з k_{ок} S_с S_{ок} jB} \ [см^3/ва]; \tag{9б}$$

$$k = \frac{K}{P} = \frac{0,1\beta_с\gamma_с (V_с + a_k V_к)}{2,22 m f_1 k_{ок} S_с S_{ок} jB} \ [руб/ва]. \tag{9в}$$

Произведение $S_с S_{ок}$ с учетом уравнений (6) равно $S_с S_{ок} = abcH = a^4 xyz$ — для однофазных броневых транс-

форматоров; $S_c S_{ок} = \frac{1}{2} abcH = \frac{1}{2} a^4 xyz$ — для однофазных и трехфазных стержневых трансформаторов.

Тогда на основании уравнений (6а)—(6в) и (9а)—(9в) выражения для удельных технико-экономических показателей рассматриваемых силовых трансформаторов по активным материалам примут следующий вид:

а) для однофазного броневого трансформатора (рис. 1)

$$g = A_g \frac{y(x+z+1) + a_g xz(2x+y+1)}{xyz} \ [кг/ва], \qquad (10а)$$

где

$$A_g = \frac{0{,}1\gamma_c}{1{,}11 f_1 k_{ок} jBa} \ [кг/ва];$$

$$v = A_v \frac{y(x+z+1) + xz(2x+y+1)}{xyz} \ [см^3/ва], \qquad (10б)$$

где

$$A_v = \frac{10^2}{1{,}11 \cdot f_1 k_3 k_{ок} jBa} \ [см^3/ва];$$

$$k = A_k \frac{y(x+z+1) + a_k xz(2x+y+1)}{xyz} \ [руб/ва], \qquad (10в)$$

где

$$A_k = \frac{0{,}1\beta_c\gamma_c}{1{,}11 f_1 k_{ок} jBa} \ [руб/ва];$$

б) для однофазного стержневого трансформатора (рис. 2)

$$g = A_g \cdot \frac{y(x+z+2) + a_g xz(x+y+1)}{xyz} \ [кг/ва]; \qquad (11а)$$

$$v = A_v \cdot \frac{y(x+z+2) + xz(x+y+1)}{xyz} \ [см^3/ва]; \qquad (11б)$$

$$k = A_k \cdot \frac{y(x+z+2) + a_k xz(x+y+1)}{xyz} \ [руб/ва]; \qquad (11в)$$

в) для трехфазного стержневого трансформатора (рис. 3)

$$g = \frac{1}{3} A_g \cdot \frac{y(4x+3z+6) + 3a_g xz(x+y+1)}{xyz} \ [кг/ва]; \qquad (12а)$$

$$v = \frac{1}{3} A_v \cdot \frac{y(4x+3z+6) + 3xz(x+y+1)}{xyz} \ [см^3/ва]; \qquad (12б)$$

$$k = \frac{1}{3} A_k \cdot \frac{y(4x+3z+6) + 3a_k xz(x+y+1)}{xyz} \ [руб/ва]. \qquad (12в)$$

При определенном принятом в расчете базовом размере трансформатора a (рис. 1, 2 и 3), необходимом геометрическом поперечном сечении стержня сердечника $S_c = ab = a^2y$ и выбранной относительной высоте окна трансформатора $z = \frac{H}{a}$, оптимальные значения относительной ширины $x = \frac{c}{a}$ этого окна, при которых удельные технико-экономические показатели малых силовых трансформаторов по уравнениям (10)—(12) будут минимальными, определяются из условий:

$$\frac{\partial g}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \text{и} \quad \frac{\partial k}{\partial x} = 0. \tag{13}$$

Тогда на основании уравнений (10)—(12) оптимальные значения относительной ширины окна x получаются следующие:

а) для трансформаторов наименьшей массы однофазный броневой трансформатор (рис. 1)

$$x_0 = \sqrt{\frac{y(z+1)}{2a_g z}}; \tag{14а}$$

однофазный и трехфазный стержневые трансформаторы (рис. 2 и 3)

$$x_0 = \sqrt{\frac{y(z+2)}{a_g z}}; \tag{14б}$$

б) для трансформаторов наименьшего объема однофазный броневой трансформатор (рис. 1)

$$x_0 = \sqrt{\frac{y(z+1)}{2z}}; \tag{15а}$$

однофазный и трехфазный стержневые трансформаторы (рис. 2 и 3)

$$x_0 = \sqrt{\frac{y(z+2)}{z}}; \tag{15б}$$

в) для трансформаторов наименьшей стоимости однофазный броневой трансформатор (рис. 1)

$$x_0 = \sqrt{\frac{y(z+1)}{2a_k z}}; \tag{16а}$$

однофазный и трехфазный стержневые трансформаторы (рис. 2 и 3)

$$x_0=\sqrt{\frac{y(z+2)}{a_k z}}. \qquad (16б)$$

Как показывают уравнения (14)—(16), при данном геометрическом поперечном сечении стержня $S_c=a^2y$ силового трансформатора и постоянной относительной высоте его окна z электромагнитная мощность трансформатора получается различной при разных оптимальных удельных технико-экономических показателях, так как значения относительной ширины его окна x будут различными для минимальной массы g, минимального объема v или минимальной стоимости k трансформатора.

Для иллюстрации ниже приводится числовой пример.

Пример

Пусть сердечник силового однофазного трансформатора стержневого типа (рис. 2) на частоту $f_1=50$ *гц* имеет базовый размер $a=2$ *см*, относительную толщину пакета стержня $y=1$ и высоту окна $z=2$. Катушки выполнены из медного круглого провода, для которого в среднем $a_g=0{,}34$, $a_k=2{,}0$ и $k_{ок}=0{,}26$. Материал сердечника трансформатора — горячекатаная листовая сталь марки Э41 толщиной 0,35 *мм*, $\gamma_c=7{,}6$ *г/см*^{3}, $k_з=0{,}9$ и $\beta_c=0{,}32$ *руб/кг*. Индукция в стержне $B=1{,}3$ *тл*, плотность тока в обмотках $j\approx3$ *а/мм*^{2}.

Значения относительной ширины окна рассматриваемого силового трансформатора по уравнениям (14б), (15б) и (16б) будут равны:

а) для трансформатора наименьшей массы

$$x_0=\sqrt{\frac{y(z+2)}{a_g z}}=\sqrt{\frac{1(2+2)}{0{,}34\cdot 2}}=2{,}5;$$

б) для трансформатора наименьшего объема

$$x_0=\sqrt{\frac{y(z+2)}{z}}=\sqrt{\frac{1(2+2)}{2}}=1{,}4;$$

в) для трансформатора наименьшей стоимости

$$x_0=\sqrt{\frac{y(z+2)}{a_k z}}=\sqrt{\frac{1(2+2)}{2\cdot 2}}=1{,}0.$$

Электромагнитные, или полезные мощности этих трансформаторов по уравнению (4) будут равны:

а) при наименьшей массе

$$P = 2{,}22 m f_1 k_з k_{ок} S_с S_{ок} j B \cdot 10^{-2} =$$
$$= 2{,}22 f_1 k_з k_{ок} j B a^4 xyz \cdot 10^{-2} = 0{,}52 f_1 j B a^4 xyz \cdot 10^{-2} =$$
$$= 0{,}52 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 1{,}3 \cdot 2^4 \cdot 2{,}5 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \approx 80 \text{ } ва,$$

где $m = 2$; $S_с S_{ок} = \frac{1}{2} a^4 xyz$ [$см^4$];

б) при наименьшем объеме

$$P' = 0{,}52 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 1{,}3 \cdot 2^4 \cdot 1{,}4 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 45 \text{ } ва;$$

в) при наименьшей стоимости

$$P'' = 0{,}52 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 1{,}3 \cdot 2^4 \cdot 1{,}0 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 32 \text{ } ва.$$

Коэффициенты уравнений (11) для этих трансформаторов имеют следующие значения:

$$A_g = \frac{0{,}1\gamma_с}{1{,}11 \cdot f_1 k_{ок} j B a} = \frac{0{,}1 \cdot 7{,}6}{1{,}11 \cdot 50 \cdot 0{,}26 \cdot 3 \cdot 1{,}3 \cdot 2} = 0{,}0069 \text{ } кг/ва;$$

$$A_v = \frac{10^2}{1{,}11 f_1 k_з k_{ок} j B a} = \frac{10^2}{1{,}11 \cdot 50 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}26 \cdot 3 \cdot 1{,}3 \cdot 2} =$$
$$= 0{,}985 \text{ } см^3/ва;$$

$$A_k = \frac{0{,}1\beta_с\gamma_с}{1{,}11 f_1 k_{ок} j B a} = \frac{0{,}1 \cdot 0{,}32 \cdot 7{,}6}{1{,}11 \cdot 50 \cdot 0{,}26 \cdot 3 \cdot 1{,}3 \cdot 2} = 0{,}00222 \text{ } руб/ва.$$

Удельные технико-экономические показатели будут равны:

$$g = A_g \cdot \frac{y(x+z+2) + a_g xz(x+y+1)}{xyz} =$$
$$= 0{,}0069 \cdot \frac{1(2{,}5+2+2) + 0{,}34 \cdot 2{,}5 \cdot 2(2{,}5+1+1)}{2{,}5 \cdot 1 \cdot 2} =$$
$$= 0{,}0192 \text{ } кг/ва;$$

$$v = A_v \cdot \frac{y(x+z+2) = xz(x+y+1)}{xyz} =$$
$$= 0{,}985 \cdot \frac{1(1{,}4+2+2) + 1{,}4 \cdot 2(1{,}4+1+1)}{1{,}4 \cdot 1 \cdot 2} = 5{,}25 \text{ } см^3/ва;$$

$$k = A_k \frac{y(x+z+2) + a_k xz(x+y+1)}{xyz} =$$
$$= 0{,}00222 \cdot \frac{1(1+2+2) + 2 \cdot 1 \cdot 2(1+1+1)}{1 \cdot 1 \cdot 2} = 0{,}019 \text{ } руб/ва.$$

Общие технико-экономические показатели трансформаторов по активным материалам будут следующими:

$$G = g \cdot P = 0{,}0192 \cdot 80 \approx 1{,}53 \text{ } кг;$$
$$V = v \cdot P' = 5{,}25 \cdot 45 \approx 240 \text{ } см^3;$$
$$K = k \cdot P'' = 0{,}019 \cdot 32 \approx 0{,}61 \text{ } руб.$$

Таким образом, рассмотренный числовой пример показывает, что силовые трансформаторы малой мощности, оптимальные по одному из трех удельных технико-экономических показателей — наименьшей массе, наименьшему объему или стоимости, при одинаковой индукции в сердечнике B и плотности тока в обмотках j, а также равном базовом размере a имеют разные мощности и геометрические размеры. При этих же условиях и одинаковом коэффициенте заполнения окна геометрические размеры и объем силовых трансформаторов с обмотками из алюминиевого круглого провода получаются бо́льшими на 20—30%, чем у трансформаторов с медными обмотками. Однако общая масса трансформаторов с алюминиевыми обмотками из круглого провода возрастает в меньшей степени, так как алюминий легче меди в 3,3 раза. Лишь в силовых трансформаторах с алюминиевыми обмотками из фольги, для которых коэффициент заполнения окна может достигать значений 0,6 и более, возможно некоторое уменьшение общей массы по сравнению с трансформаторами с медными обмотками, поскольку их объемы сохраняются примерно одинаковыми.

При проектировании силовых трансформаторов малой мощности с оптимальными размерами для получения минимального значения одного из удельных технико-экономических показателей — массы, объема или стоимости — следует учитывать также технологические условия изготовления трансформаторов. Так, например, при расчете трансформатора не следует принимать слишком малые значения относительной ширины окна x. Обычно на практике по условиям обмотки в окне трансформатора выбирают $x \geqslant 0{,}5$. Точно так же по условиям удобства намотки катушек на стержни сердечника не следует принимать слишком малые или большие значения относительной толщины пакета стержня y. Целесообразные значения y принадлежат диапазону $1 \leqslant y \leqslant 2$. Наконец, по общим габаритным соотношениям в трансформаторе нецелесообразно также выбирать слишком малые или большие значения относительной высоты окна z. В малых однофазных броневых трансформаторах при медных обмотках обычно $z = 1{,}5 \div 2{,}5$, в однофазных и трехфазных стержневых трансформаторах $z = 2 \div 3$. При алюминиевых обмотках величина z примерно на

20—30% больше указанных величин. В теплостойких стержневых трансформаторах эта величина может быть $z = 3 \div 5$. Вместе с тем оптимальные геометрические размеры трансформаторов малой мощности получаются разными при медных и алюминиевых обмотках, так как коэффициенты a_g и a_k в уравнениях (14а и б) и (16а и б) для этих материалов различны.

При выбранных значениях базового размера трансформатора a, относительной толщины пакета сердечника y и относительной высоты окна z можно с помощью уравнений (14)—(16) определить оптимальные значения относительной ширины окна x для разных типов силовых трансформаторов малой мощности при соответствующих активных материалах сердечника и обмоток, для которых их технико-экономические показатели по массе, объему или стоимости являются наименьшими. В табл. 1 в виде примера представлены оптимальные относительные геометрические размеры броневых, однофазных и трехфазных стержневых силовых трансформаторов малой мощности, полученные по уравнениям (14)—(16) при соответствующих выбранных значениях y и z. При других значениях этих величин, отличающихся от данных в табл. 1, оптимальные значения относительной ширины окна x для указанных трансформаторов будут другими.

Как показывает табл. 1, относительные оптимальные геометрические размеры трансформаторов наименьшей массы при соответствующих обмотках получаются одинаковыми независимо от материала сердечника. То же наблюдается и в отнощении оптимальных размеров трансформаторов наименьшего объема. Что касается оптимальных относительных размеров трансформаторов наименьшей стоимости, то они зависят как от материала обмоток, так и сорта стали сердечника.

Однако следует отметить, что малые силовые трансформаторы при массовом их производстве обычно проектируют и изготовляют на стандартных сердечниках, составляющих унифицированные ряды типовых размеров. Такие ряды сердечников представляют обычно компромиссное решение проблемы оптимальных трансформаторов либо по наименьшей массе, либо по наименьшей стоимости. Трансформаторы наименьшей массы обычно предназначаются для аппаратуры специальной техники,

Таблица 1

Тип трансформатора	Материал сердечника и обмоток		Оптимальные относительные геометрические размеры трансформатора								
			Наименьшей массы			Наименьшего объема			Наименьшей стоимости		
			x	y	z	x	y	z	x	y	z
Однофазный броневой	Горячекатаная сталь	Медная обмотка	1,6—1,4	1	1,5—2,5	0,9—0,8	1	1,5—2,5	0,7—0,6	1	1,5—2,5
		Алюминиевая обмотка	2,7—2,6	1	2—3	0,9—0,8	1	2—3	0,8—0,7	1	2—3
	Холоднокатаная сталь	Медная обмотка	1,6—1,4	1	1,5—2,5	0,9—0,8	1	1,5—2,5	0,8	1	1,5—2,5
		Алюминиевая обмотка	2,7—2,6	1	2—3	0,9—0,8	1	2—3	1,0	1	2—3
Однофазный стержневой	Горячекатаная сталь	Медная обмотка	2,4—2,2	1	2—3	1,4—1,3	1	2—3	1—0,9	1	2—3
		Алюминиевая обмотка	4,2—4	1	2,5—3,5	1,3—1,2	1	2,5—3,5	1,2—1,1	1	2,5—3,5

Продолжение табл. 1

Тип трансформатора	Материал сердечника и обмоток		Оптимальные относительные геометрические размеры трансформатора								
			Наименьшей массы			Наименьшего объема			Наименьшей стоимости		
			x	y	z	x	y	z	x	y	z
Однофазный стержневой	Холоднокатаная сталь	Медная обмотка	2,4—2,2	1	2—3	1,4—1,3	1	2—3	1,3—1,2	1	2—3
		Алюминиевая обмотка	4,2—4	1	2,5—3,5	1,3—1,2	1	2,5—3,5	1,6—1,5	1	2,5—3,5
Трехфазный стержневой	Горячекатаная сталь	Медная обмотка	2,4—2,2	1	2—3	1,4—1,3	1	2—3	1—0,9	1	2—3
		Алюминиевая обмотка	4,2—4	1	2,5—3,5	1,3—1,2	1	2,5—3,5	1,2—1,1	1	2,5—8,5
	Холоднокатаная сталь	Медная обмотка	2,4—2,2	1	2—3	1,4—1,3	1	2—3	1,3—1,2	1	2—3
		Алюминиевая обмотка	4,2—4	1	2,5—3,5	1,3—1,2	1	2,5—3,5	1,6—1,5	1	2,5—3,5

а трансформаторы наименьшей стоимости — для бытовой аппаратуры. Во всех случаях для получения унифицированных рядов сердечников трансформаторов неизбежно приходится отступать от теоретических соотношений их оптимальных геометрических размеров.

При построении стандартных рядов сердечников для силовых трансформаторов малой мощности целесообразно по условиям проектирования разных типов их создавать ряды сердечников для трансформаторов наименьшей массы, наименьшей стоимости и т. д. При создании таких рядов необходимо учитывать технологические условия, чтобы число изменяемых параметров было минимальным. Например, для шихтованных сердечников наиболее приемлемой величиной является изменение толщины пакета сердечника $y=\frac{b}{a}$. В таблицах Приложений II, III и IV даны стандартные ряды броневых сердечников из штампованных пласт н по нормалям НО. 666. 000 и НИО. 010. 005 [7].

При проектировании силовых трансформаторов малой мощности определенный интерес представляют отношения массы сердечника $G_с$ к массе материала катушек обмоток $G_к$ и объема сердечника $V_с$ к объему катушек $V_к$. Эти отношения можно получить из уравнения (7) с учетом уравнений (6). На основании этих уравнений для малых силовых трансформаторов с медными обмотками получаются следующие выражения:

а) для однофазного броневого трансформатора (рис. 1)

$$\frac{G_с}{G_к}=3\cdot\frac{y(x+z+1)}{xz(2x+y+1)}; \qquad (17а)$$

$$\frac{V_с}{V_к}=\frac{y(x+z+1)}{xz(2x+y+1)}; \qquad (17б)$$

б) для однофазного стержневого трансформатора (рис. 2)

$$\frac{G_с}{G_к}=3\cdot\frac{y(x+z+2)}{xz(x+y+1)}; \qquad (18а)$$

$$\frac{V_с}{V_к}=\frac{y(x+z+2)}{xz(x+y+1)}; \qquad (18б)$$

в) для трехфазного стержневого трансформатора (рис. 3)

$$\frac{G_c}{G_к}=\frac{y(4x+3z+6)}{xz(x+y+1)}; \quad (19а)$$

$$\frac{V_c}{V_к}=\frac{y\left(\frac{4}{3}x+z+2\right)}{xz(x+y+1)}. \quad (19б)$$

Для малых силовых трансформаторов с алюминиевыми обмотками отношения масс $\frac{G_c}{G_к}$ можно определить по этим же выражениям, но только помножив правую часть уравнений (17а), (18а) и (19а) на 3,3, так как удельная масса алюминия в 3,3 раза меньше удельной массы меди. Выражения (17б), (18б) и (19б), определяющие отношения объемов $\frac{V_c}{V_к}$ для алюминиевых обмоток, останутся неизменными.

ГЛАВА ВТОРАЯ

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

1. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для сердечников силовых трансформаторов малой мощности в диапазоне мощностей от единиц до нескольких сотен вольт-ампер в качестве магнитного материала широко используется как горячекатаная, так и холоднокатаная листовая электротехническая сталь разных марок и толщин. Для сердечников специальных пиковых и импульсных трансформаторов, кроме указанных сталей, применяются также листовой материал из сплава железа с никелем, называемый пермаллоем, и низкокоэрцитивные прессованные магнитные материалы, получившие название ферритов.

Марки горячекатаной и холоднокатаной листовых электротехнических сталей, их магнитные свойства и удельные потери энергии в них определяются ГОСТом 802—58. Марка стали характеризует степень легирования стали кремнием. Листовая электротехническая сталь по степени легирования ее кремнием, магнитным

и электрическим свойствам по указанному ГОСТу подразделяется на четыре группы марок (Приложение V).

Первая группа марок означает слаболегированную сталь, вторая — среднелегированную, третья — повышеннолегированную и четвертая группа — высоколегированную сталь. Как показывают данные этого ГОСТа, марки сталей условно обозначаются буквой Э с соответствующими цифрами, объяснения которым даются в Приложении V. Например, часто применяемые для сердечников силовых трансформаторов малой мощности листовые стали марок Э41 и Э42 представляют собой электротехническую сталь, высоколегированную, с удельными потерями при перемагничивании стали с частотой 50 *гц* и магнитной индукции в сильных полях.

Первые две группы марок электротехнической стали по ГОСТу 802—58 имеют толщину листа 0,5 *мм*, третья и четвертая группы — 0,5 и 0,35 *мм*. Кроме того, стали марок Э340, Э41—Э48 имеют еще толщину листа 0,2 *мм*, а сталь марки Э44 — также 0,15 и 0,10 *мм*. Размеры листов каждой марки стали приводятся в указанном ГОСТе (Приложение V).

Удельные магнитные потери энергии в листовой электротехнической стали зависят от ее марки, индукции, частоты перемагничивания и толщины листа. Естественно, что с уменьшением толщины листа эти потери, при прочих равных условиях, значительно уменьшаются за счет снижения потерь на вихревые токи. Чем выше легирование стали кремнием, тем меньше удельные потери энергии в ней. В холоднокатаной стали эти потери при одинаковых условиях меньше, чем в горячекатаной. Конкретные данные удельных потерь в стали приводятся в приложении V.

Для изготовления сердечников силовых трансформаторов малой мощности в настоящее время используются горячекатаные стали марок Э41 и Э42 толщиной 0,5 и 0,35 *мм* для частоты 50 *гц* и марки Э44 толщиной 0,35 — 0,10 *мм* для частоты 400 *гц* и выше, а также холоднокатаные стали марок Э310, Э320 и Э330 толщиной 0,5 и 0,35 *мм* для частоты 50 *гц* и марки Э340 толщиной 0,2 *мм* для повышенных частот. Холоднокатаные стали обладают повышенными магнитными свойствами вдоль направления проката, поэтому

из этих сталей выгоднее всего выполнять витые сердечники трансформаторов (рис. 8).

Магнитные свойства перечисленных марок сталей приводятся в ГОСТе 802—58 (Приложение V) и даются кривыми намагничивания (рис. 42).

Для сердечников трансформаторов, работающих при повышенных частотах, а также пиковых и импульсных трансформаторов, находят применение некоторые сплавы железа с никелем, называемые пермаллоем, марок 50Н, 79НМ и т. д. На высоких частотах для импульсных трансформаторов используют также магнитодиэлектрики и ферриты. Некоторые данные и магнитные свойства этих материалов приводятся в табл. 2 [7]

Таблица 2

Материал	Удельная масса, *г/см³*	Марка	Толщина, *мм*	Индукция насыщения, *тл*	Свойства на переменном токе при частотах, *гц*					
					400			1000		
					Удельные потери, *вт/кг*			Удельные потери, *вт/кг*		
					Индукция, *тл*			Индукция, *тл*		
					0,3	0,5	1,0	0,3	0,5	1,0
Пермаллой	8,2	50Н	0,15 0,05	1,5	0,6 0,5	1,5 1,3	5,5 5,0	2,1 1,6	5 4	20 14
	8,5	79НМ	0,10 0,05 0,02	0,7	0,2 0,15 0,2	0,5 0,45 0,55	— — —	0,7 0,6 0,5	2 1,6 1,3	— — —
Феррит	4,6	Феррит-400	—	0,23	—	—	—	—	—	—
Магнитодиэлектрик	5,0	ВЧ-30	—	0,2	—	—	—	—	—	—

II. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Электроизоляционные материалы различного класса нагревостойкости имеют широкое применение в трансформаторах малой мощности. По ГОСТу 8865—58 класс

нагревостойкости этих материалов характеризуется определенной предельно допустимой максимальной температурой нагрева при использовании их в электрооборудовании, длительно (в течение ряда лет) работающего в нормальных для данного вида электрооборудования эксплуатационных условиях. По указанному ГОСТу установлено несколько классов электроизоляционных материалов по нагревостойкости в зависимости от предельно допустимой температуры нагрева их. Условно эти классы обозначаются по возрастающей допустимой температуре нагрева латинскими буквами *А*, *Е*, *В*, *F*, *Н*, *С*.

Длительная рабочая температура, допустимая для этих классов, соответственно равна, °С: 105, 120, 130, 155, 180, более 180.

Электроизоляционные материалы класса *А* (рабочая температура 105° С) представляют собой пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы и шелка. К ним относятся текстильные материалы на основе хлопка, натурального шелка и целлюлозы; целлюлозные электроизоляционные бумаги, картон и фибра; древесина; пленкоэлектрокартон, лакоткани на основе хлопчатобумажной пряжи и натурального шелка; лакобумаги; изоляция эмальпроводов; термореактивные компаунды. Из перечисленных материалов класса *А*, используемых в трансформаторах малой мощности, можно отметить кабельную бумагу марки К, телефонную бумагу марки КТН, лакоткань на хлопчатобумажной основе ЛХ и на шелковой ЛШ и ЛШС (ГОСТ 2214—66, Приложение VI), картон электроизоляционный марки ЭВ (ГОСТ 2824—60, приложение VII), масляно-битумный лак № 447 для пропитки обмоток, компаунд для обволакивания обмоток марки МБК и т. д.

Электроизоляционные материалы класса *Е* (рабочая температура 120° С) представляют собой некоторые синтетические органические пленки (например, изоляция эмальпроводов; слоистые пластики на основе целлюлозных бумаг и тканей; пластмассы с органическим наполнителем и термореактивные синтетические смолы и компаунды). Из этих материалов класса *Е*, используемых в малых трансформаторах, можно отметить,

например, пленку лавсан и синтетические смолы и компаунды.

Электроизоляционные материалы класса *B* (рабочая температура 130° С) представляют собой материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами. К ним относятся материалы на основе щипаной слюды с бумажной или тканевой подложкой; стеклолакоткани; асбестовые волокнистые материалы с органическим связующим составом; изоляция эмальпроводов; пластмассы с неорганическим наполнителем; термореактивные синтетические компаунды с минеральным наполнителем. В малых трансформаторах из этого класса материалов применяются: лакоткань стеклянная марки ЛСБ (ГОСТ 10156—66) и марки ЛСК (ТУ35-386—65), стеклолакоткань марки ЛСКЛ (ГОСТ 10156—66), стеклотекстолит марки СТ (ГОСТ 2910—67) для сборных каркасов катушек, эпоксидные компаунды марок ЭД-5 и ЭД-37.

Электроизоляционные материалы класса *F* (рабочая температура 155° С) представляют собой материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами. Среди них можно отметить материалы на основе щипаной слюды без подложки или с неорганической подложкой; стекловолокнистую и асбестовую изоляцию проводов; слоистые пластины на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов. Из этого класса материалов в малых трансформаторах применяются стеклолакоткань марки ЛСКЛ (ГОСТ 10156—66), стеклотекстолит марки СТ (ГОСТ 2910—67) для литых каркасов катушек.

Электроизоляционные материалы класса *H* (рабочая температура 180° С) представляют собой материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами. К ним относятся материалы на основе щипаной слюды без подложки или с неорганической подложкой; стекловолокнистая изоляция проводов; пластические массы с неорганическим наполнителем; асбестоцемент пропитанный; асбестовые материалы. Из этого класса материалов в малых трансформаторах применяются стеклолакоткань марки ЛСКЛ

(ГОСТ 10156—66), стекломикалента марки ГФС (ГОСТ 8727—58), кремнийорганические лаки марки К-47, К-57.

Электроизоляционные материалы класса *С* (рабочая температура более 180° С) представляют собой материалы в виде слюды, керамические материалы, стеклокварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими связующими составами. Этот класс материалов находит применение в теплостойких трансформаторах малой мощности, например, пленка фторопласта-4, термостойкие пресс-порошки АГ-4, К-41 для изготовления каркасов катушек и некоторые другие материалы.

Для наружного покрытия трансформаторов малой мощности применяются покровные лаки и эмали разных марок, а также заливочные компаунды. Из покровных лаков можно назвать, например, лаки марок АСФ и СБ, а из эмалей — серую эмаль воздушной сушки марки СВД или печной сушки марки СПД.

III. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Для обмоток трансформаторов малой мощности применяются круглые медные и алюминиевые обмоточные провода различных марок по нагревостойкости, а также алюминиевая фольга в виде лент. Следует отметить, что, как указывалось выше, при одинаковом диаметре и той же марке изоляции круглые алюминиевые обмоточные провода значительно дороже медных проводов, причем с уменьшением диаметра провода это различие в стоимости возрастает.

Алюминиевые обмоточные провода по МРТУ 2-43-14—61 выпускаются только эмалированными, изолированными высокопрочной эмалью на основе поливинилацетатных лаков (марка ПЭВА) и высокопрочной эмалью на основе полиамиднорезольного лака (марка ПЭЛРА). При этом диапазон номинальных диаметров голых алюминиевых проводов составляет 0,08—2,44 *мм* (Приложение I). По нагревостойкости алюминиевые обмоточные провода марок ПЭВА и ПЭЛРА относятся к классам изоляции *А* (рабочая температура 105° С) и *Е* (температура 120° С).

Круглые медные обмоточные провода выпускаются по ГОСТу 2773—51, ГОСТу 6324—52, ГОСТу 7019—60,

ГОСТ 7262—54, МРТУ 2-43-12—61 различных марок по нагревостойкости (Приложение I).

Перечисленные в Приложении I марки медных проводов расшифровываются следующим образом:

ГОСТ 2773—51

ПЭЛ — провод эмалированный лакостойкий, по нагревостойкости относится к классу *А* (рабочая температура 105° С);

ПЭТ — провод эмалированный лакостойкий с повышенной теплостойкостью, по нагревостойкости относится к классу *В* (рабочая температура 130° С).

ГОСТ 7262—54

ПЭВ-2—провод, изолированный высокопрочной эмалью (винифлекс) в два слоя, по нагревостойкости относится к классам *Е* и *В* (рабочая температура соответственно 120 и 130° С).

ГОСТ 6324—52

ПЭЛШО — провод, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из натурального шелка;

ПЭЛШКО — провод, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из шелка капрон;

ПБД — провод, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи.

Все эти три марки проводов указанного ГОСТ по нагревостойкости относятся к классу *А* (рабочая температура 105° С).

ГОСТ 7019—60

ПЭТКСОТ — провод эмалированный теплостойкий со стекловолокном в один слой, по нагревостойкости относится к классу *Н* (рабочая температура 180° С).

Ведомственные технические условия:

МРТУ 2-43-12—61

ПЭТВ — провод эмалированный лакостойкий с высокой теплостойкостью, по нагревостойкости относится к классу *Н* (рабочая температура 180° С).

МИО 003—63

ПЭФ-2 — провод, изолированный фторопластовой эмалью в два слоя, по нагревостойкости относится к классу *С* (рабочая температура более 180° С).

Обмоточные провода марок ПЭЛ и ПБД (по нагревостойкости класс *А*) применяются в трансформаторах малой мощности при отсутствии повышенных требований по надежности и в случае необходимости получения малой стоимости, как, например, трансформаторы для бытовой аппаратуры.

Провода марок ПЭЛШО и ПЭЛШКО (по нагревостойкости класс *А*) применяются в трансформаторах малой мощности, когда требуется повышенная механическая прочность, а стоимость трансформатора не ограничена.

Провода марок ПЭТ и ПЭВ-2 (по нагревостойкости классы *Е* и *В*) обычно используются в трансформаторах малой мощности повышенной нагревостойкости при отсутствии особых требований по надежности.

Провода марок ПЭТВ, ПЭТКСОТ и ПЭФ-2 (по нагревостойкости классы *Н* и *С*) принадлежат к категории теплостойких медных обмоточных проводов, допускающих длительно температуру нагрева до 180—200° С. Эти провода применяются в теплостойких малогабаритных силовых трансформаторах малой мощности специального назначения. В некоторых теплостойких трансформаторах малой мощности применяются также обмоточные медные провода марки ПСДКТ — провода особотеплостойкие с утоненной двухслойной обмоткой из стекловолокна (ТУКП 18—58); по нагревостойкости эти провода могут использоваться длительно при рабочей температуре до 300° С.

При изготовлении трансформаторов малой мощности, кроме обмоточных проводов разных марок, для соединения концов обмоток с выводами трансформаторов применяются также различные монтажные провода. По конструкции эти провода гибкие, многопроволочные. Обычно применяются следующие марки монтажных проводов:

МГВЛ — многопроволочный в оплетке, покрытой лаком (ВТУ МЭП 680—47);

МГШВ — гибкий с пленочной или волокнистой и поливинилхлоридной изоляцией (МРТУ 2-017-1 — 62);

МГШД — многопроволочный с двойной обмоткой из полиамидного волокна (ГОСТ 10349—63);

МРГ — многопроволочный с резиновой изоляцией (ВТУ НКЭП, 138—45).

Для теплостойких трансформаторов малой мощности находят применение также следующие марки монтажных проводов:

ПТЛ-200 — лакированный провод на рабочую температуру до 200° С (ТУОМУ 505.087—60);

ПТЛ-250 — то же, на температуру до 250° С;

ПТЛЭ-200 и ПТЛЭ-250 — те же провода, но экранированные.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Расчет силовых трансформаторов малой мощности в диапазоне мощностей от нескольких единиц до нескольких сотен вольт-ампер несколько отличается от расчета силовых трансформаторов большой мощности и имеет некоторые особенности в отношении определения первичного тока, выбора индукции, падения напряжения в обмотках и так далее.

Для правильного выбора окончательного варианта проектируемого трансформатора необходимо иметь в виду связь между стоимостью трансформатора и величиной его к. п. д.

Расчет и опыт показывают, что можно рассчитать и построить трансформатор с весьма высоким к. п. д., однако это не является еще признаком наивыгоднейшего варианта трансформатора, так как при выборе его нужно учитывать также и другие технико-экономические показатели, как, например, размеры, массу и стоимость трансформатора. Уменьшение массы и стоимости трансформатора связано с увеличением индукции в сердечнике и плотности тока в обмотках, что ведет к увеличению потерь в сердечнике и обмотках трансформатора, а следовательно, к повышению нагрева его. При этом к. п. д. трансформатора уменьшается.

Предельно допустимая температура нагрева малых трансформаторов, например для изоляции обмоток класса *А*, может составлять 105° С или превышать температуру окружающей среды на 65° С при температуре этой среды 40° С. Следовательно, пределом использо-

вания активных материалов является нагрев трансформаторов. К. п. д. трансформатора в зависимости от мощности представляет собой кривую, имеющую максимум при определенной нагрузке (рис. 4).

Условия, при которых к. п. д. малых трансформаторов получается наибольшим, определяются из уравнения

$$\frac{d\eta}{dP_1}=0.$$

Величина к. п. д. для малых трансформаторов в случае $\cos\varphi_2=1$ может быть представлена уравнением

$$\eta=\frac{P_1-I_\mu^2 r_1-\left(\frac{P_1}{U_1}\right)^2 r_к-P_с}{P_1}.$$

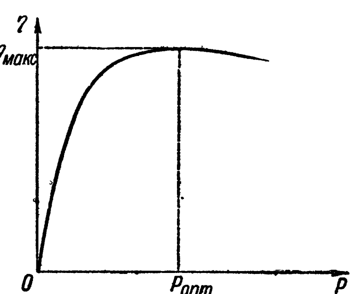


Рис. 4. К.п.д. трансформатора в зависимости от нагрузки.

Из условия $\frac{d\eta}{dP_1}=0$ получаем:

$$I_\mu^2 r_1+P_с=\left(\frac{P_1}{U_1}\right)^2 r_к,$$

где

I_μ — намагничивающий ток трансформатора;

$$I_\mu\approx\sqrt{I_1^2-I_{1а}^2};$$

$I_{1а}$ — активная составляющая тока первичной обмотки трансформатора; $r_к$ — активное сопротивление короткого замыкания обмоток трансформатора;

$$r_к=r_1+r_2\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2;$$

$P_с$ — магнитные потери в сердечнике трансформатора; P_1 — потребляемая трансформатором мощность из сети; $I_\mu^2 r_1+P_с$ — потери в трансформаторе, не зависящие от нагрузки; $\left(\frac{P_1}{U_1}\right)^2 r_к$ — потери, зависящие от нагрузки.

Таким образом, к. п. д. трансформатора малой мощности будет максимальным при равенстве переменных и постоянных потерь в нем. Так как величина I_μ

по условиям уменьшения стоимости в малых трансформаторах составляет до 40—50% от $I_{1а}$, к. п. д. этих трансформаторов получается максимальным, когда

$$P_с \approx (0{,}75 \div 0{,}80)\, P_к.$$

Следовательно, при расчете малых силовых трансформаторов, работающих приблизительно при номинальных нагрузках, следует стремиться к следующему отношению потерь в катушках обмоток к магнитным потерям в сердечнике:

$$\beta = \frac{P_к}{P_с} \approx 1{,}2 \div 1{,}4.$$

В большинстве случаев силовые трансформаторы малой мощности являются встроенной частью различных аппаратов и устройств и нередко работают при окружающей температуре $+80 \div +150°$ C вместо $+40°$ C по общим нормам. Последнее обстоятельство должно учитываться при определении предельной допускаемой температуры нагрева обмоток при соответствующем классе изоляции.

Силовые трансформаторы малой мощности обычно строятся однофазными, однако в ряде случаев встречаются также и трехфазные трансформаторы. Эти трансформаторы обычно имеют естественное воздушное охлаждение. Нормальный срок службы малых силовых трансформаторов, благодаря быстрому „моральному“ и физическому износу аппаратуры, частью которой они являются, значительно меньше, чем для электрических машин и трансформаторов большой мощности. В соответствии с уменьшенным сроком службы следует при проектировании силовых трансформаторов малой мощности стремиться к уменьшению их стоимости путем максимального использования активных материалов и упрощения их конструкции.

Как известно, в трансформаторах масса материала сердечника и обмоток находятся во взаимно обратной зависимости, т. е. при увеличении массы активной стали расход материала на обмотки уменьшается. Так как цена обмоточной меди или алюминия в малых трансформаторах значительно выше стоимости стали, то отношение массы стали к массе материала обмоток делают выше, чем для трансформаторов большой мощ-

ности. Малые силовые трансформаторы, рассчитанные на минимум стоимости, обычно имеют $\frac{G_c}{G_к} = 4 \div 6$ или выше. Трансформаторы минимальной массы имеют $\frac{G_c}{G_к} = 2 \div 3$.

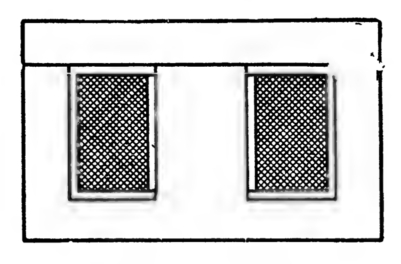


Рис. 5. Трансформатор броневого типа.

Таким образом, из вышеизложенного вытекает, что правильно рассчитанный силовой трансформатор малой мощности должен иметь или минимальную стоимость, или минимальную массу, удовлетворять заданным техническим требованиям и иметь возможно более высокий к. п. д.

Типы силовых трансформаторов малой мощности. Силовые трансформаторы малой мощности строят:

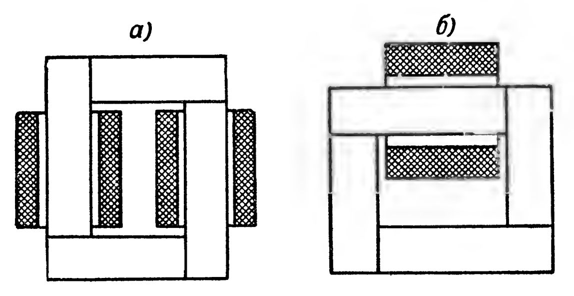


Рис. 6. Трансформаторы стержневого типа: *а* — с двумя катушками; *б* — с одной катушкой.

а) броневого типа (рис. 5); б) стержневого типа с двумя катушками (рис. 6, *а*) и с одной катушкой (рис. 6, *б*).

Большинство силовых трансформаторов малой мощности строят броневого типа с сердечником из штампованных Ш-образных пластин (Приложения II, III и IV). Однако трансформаторы стержневого типа с одной или двумя катушками также находят достаточное применение. Малые трансформаторы стержневого типа с двумя катушками имеют лучшее охлаждение и требуют меньшего расхода материала на обмотку из-за

меньшей средней длины витка и бóльшей возможной плотности тока в обмотках.

Трехфазные силовые трансформаторы малой мощности выполняют стержневого типа или из штампован-

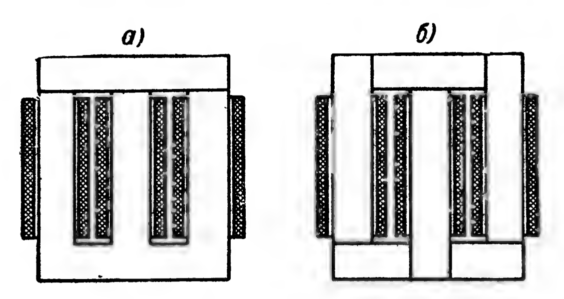


Рис. 7. Трехфазные трансформаторы с различной штамповкой пластин: *а* — с Ш-образными; *б* — с прямоугольными пластинами.

ных Ш-образных пластин (рис. 7,*а*), или из прямоугольных пластин (рис. 7,*б*).

В последнее время получили распространение малые трансформаторы с тороидальными витыми сердечниками

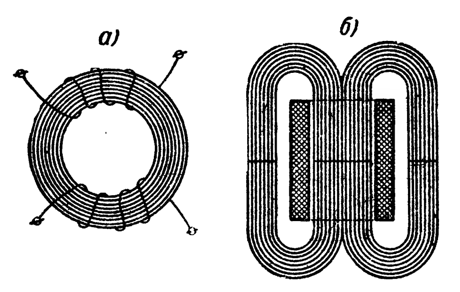


Рис. 8. Трансформаторы с витыми сердечниками: *а* — тороидальным; *б* — Ш-образным.

и с Ш-образными витыми разрезными сердечниками (рис. 8,*а* и *б*). Витые сердечники малых трансформаторов, в особенности выполненные из холоднокатаной стали, имеют более высокую магнитную проводимость, что позволяет несколько повысить индукцию в них и благодаря этому уменьшить массу трансформатора.

Форма поперечного сечения стержня и катушек. В малых силовых трансформаторах форма поперечного сечения стержня бывает прямоугольная (рис. 9,*а*) или квадратная (рис.9,*б* и *в*). В последнем случае катушки делаются или прямоугольной (рис. 9,*б*), или круглой формы (рис. 9,*в*).

Крепление сердечника трансформатора. В силовых трансформаторах малой мощности применяются два основных способа крепления собранного пакета сердечника:

1) крепление с помощью шпилек. В этом случае пакет сердечника трансформатора сжимается посредст-

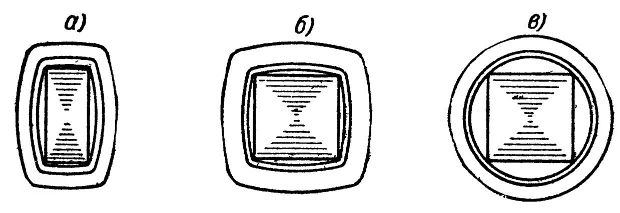


Рис. 9. Формы поперечного сечения стержней и катушек малых трансформаторов: *а* — с прямоугольными катушками; *б* — с квадратными катушками; *в* — с круглыми катушками.

вом шпилек и скоб из полосовой стали толщиной 1—2 *мм* (рис. 10). В броневых трансформаторах для крепления сердечника иногда применяется штампованная из листовой стали деталь, служащая одновременно и кожухом трансформатора (рис. 11);

2) крепление запрессовкой сердечника в обойму. В этом случае собранный пакет сердечника трансформатора обжимается специальной обоймой, ушки которой служат для крепления трансформатора на месте установки (рис. 12). Крепление обоймой может применяться при мощностях трансформатора до 100 *ва* и выше.

Заготовка пластин для сердечника трансформатора. Материалом для сердечника малого силового трансформатора служит специальная листовая электротехническая сталь марок Э41, Э42, Э44, Э310, Э320, Э330, толщиной листа 0,5 и 0,35 *мм*. Основные технические данные листовой стали различных марок определяются ГОСТОМ 802—58 (Приложение V).

Для изготовления сердечника из листовой стали штампуются пластины П-образной формы в случае однофазных стержневых трансформаторов и Ш-образной формы — для однофазных броневых и трехфазных транс-



Рис. 10. Трансформатор с сердечником, стянутым накладками.

Рис. 11. Трансформатор с сердечником, стянутым штампованными крышками.

Рис. 12. Трансформатор с запрессованным в обойму сердечником.

форматоров. Если невозможна штамповка фигурных пластин, то производится заготовка прямоугольных пластин резкой листов на ножницах. Как при штамповке, так и при резке заготовок из листов стали

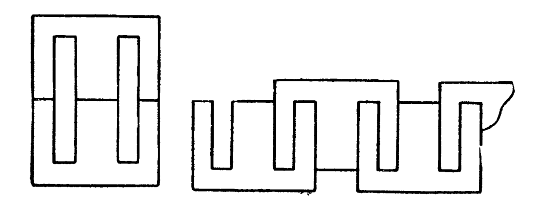


Рис. 13. Способы «безотходной» штамповки пластин трансформатора броневого типа.

желательно делать пластины вдоль направления прокатки стали, так как магнитная проницаемость стали в этом направлении несколько больше.

При штамповке и резке заготовок необходимо производить раскрой стали с возможно меньшими отходами (рис. 13). Для уменьшения отходов размеры и форма пластин сердечника при расчете должны быть

выбраны с учетом размеров стандартного листа стали 750 × 1500 или 1000 × 2000 *мм.* В целях уменьшения потерь на вихревые токи в сердечнике трансформатора листы стали покрываются с одной стороны или тонким слоем лака, или оксидируются.

Изготовление витых сердечников малых трансформаторов производится из холоднокатаной стали на специальных намоточных станках. Изоляцией между витками обычно служит оксидная пленка. После термической обработки витки сердечника могут склеиваться бакелитовым лаком и запекаться. Полимеризация этого

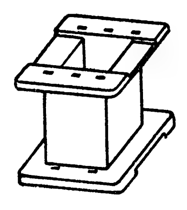


Рис. 14. Штампованный из пластмассы каркас катушки трансформатора.

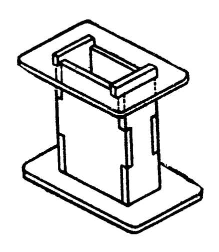


Рис. 15. Сборный каркас катушки трансформатора.

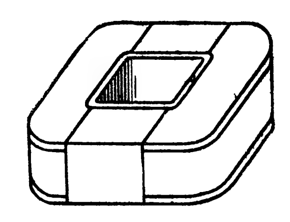


Рис. 16. Бескаркасная намотка катушки трансформатора.

лака производится при температурах 100—150° С. В случае необходимости разрезки сердечника (см. рис. 8, *б*), эта операция выполняется корундовым кругом. Плоскости разрезанных поперечных частей затем шлифуются на шлифовальном станке.

Конструкция катушек малых трансформаторов. Катушки малых силовых трансформаторов, имеющих обмотку из проводов малого диаметра, как правило, выполняются в виде каркаса, на который наматываются обмотки. Каркасы катушек делаются обычно из изолирующего материала или путем штамповки из пластмассы (рис. 14), или клеются из электрокартона, гетинакса и других материалов (рис. 15). В отдельных случаях, при диаметрах проводов порядка 1 *мм* и выше, катушки могут выполняться без каркаса. При этом намотка производится на изоляционную гильзу из электрокартона, отдельные слои обмотки перевязываются хлопчатобумажной лентой (рис. 16).

Пропитка катушек изолирующим лаком. После намотки катушки должны быть пропитаны изолирующим лаком. Пропитка лаком повышает электрическую прочность изоляции обмотки, увеличивает ее механическую прочность, увеличивает теплостойкость и теплопроводность изоляциии, а также защищает обмотку от влаги. В качестве пропитывающих лаков могут быть использованы асфальто-масляные лаки № 447 и 458, глипталевый лак № 321. Не следует применять в качестве разбавителей лака бензол, вредно действующий на эмалевую пленку обмоточных проводов.

Перед пропиткой катушки должны быть просушены в течение 2—3 *ч* при температуре около 100° С. Пропитка катушек лаком производится при температуре 60—70° С в течение 3—5 *мин*, а сушка лака — при температуре 110—115° С в течение 3—8 *ч*.

Пропитка катушек лаком получается более эффективной при создании в пропиточном котле вакуума до 1 *мм рт. ст.* с последующим повышением давления после некоторого времени примерно до 3—4 *атм*.

Выбор материала для сердечника. Как указывалось выше, материалом для сердечников силовых трансформаторов малой мощности служит специальная листовая электротехническая сталь различных марок, обозначаемых по ГОСТу 802—58 в виде Э11, Э41, Э44, Э310, Э320 и т. д. Выбор стали для сердечника определяется назначением трансформатора, частотой сети и техническими условиями задания на проектирование.

Для малых трансформаторов минимальной стоимости в основном применяется сталь марки Э41 толщиной $\delta_с = 0{,}5$ *мм*, с удельными потерями $k_с = 1{,}6$ *вт/кг* при $B = 1$ *тл*, $f_1 = 50$ *гц* и $\delta_с = 0{,}35$ *мм*, с удельными потерями $k_с = 1{,}35$ *вт/кг* при $B = 1$ *тл*. Для малых трансформаторов можно иногда применить сталь марки Э11. Сталь марки Э11 мягкая, обрабатывается легче, чем сталь Э41, и дешевле по стоимости, но имеет повышенные удельные потери $k_с = 3{,}3$ *вт/кг* при $B = 1$ *тл*, $f_1 = 50$ *гц* и $\delta_с = 0{,}5$ *мм*.

Применение стали марки Э11 толщиной $\delta_с = 0{,}5$ *мм* для сердечников малых трансформаторов при частоте 50 *гц* иногда может быть оправдано в так называемых дешевых трансформаторах из-за возможной экономии материала на обмотки (около 7%) за счет бо́льшего

коэффициента заполнения поперечного сечения сердечника сталью, а также вследствие некоторого уменьшения стоимости сердечника при почти неизменных значениях общих потерь и к. п. д.

Для трансформаторов минимальной массы с витыми сердечниками может быть применена холоднокатаная сталь с повышенной магнитной проницаемостью марок Э310, Э320 и Э330.

Для малых трансформаторов повышенной частоты (400 *гц* и выше) может быть рекомендована сталь марок Э340, Э44, Э47 и Э48 с толщиной листа $\delta_c = 0{,}35$ *мм* и $\delta_c = 0{,}20 \div 0{,}10$ *мм* и пониженными удельными потерями.

При выборе толщины листа стали, необходимо учитывать зависимость коэффициента заполнения поперечного сечения стержня сталью.

Средние значения коэффициента заполнения даны в табл. 3.

Таблица 3

Толщина листа $\delta_{ср}$, *мм*	Коэффициент заполнения поперечного сечения стержня сталью $k_з$	Изоляция между листами
0,5	0,92	Лак
0,35	0,86	»
0,2	0,76	»
0,1	0,65	»

II. РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Исходными данными для расчета силовых трансформаторов малой мощности являются следующие величины:

число фаз m;

номинальные мощности вторичных обмоток P_2, P_3, ..., P_n [*ва*];

номинальные напряжения U_1, U_2, ..., U_n [*в*];

частота сети f_1 [*гц*];

коэффициенты мощности нагрузок $\cos\varphi_2$, $\cos\varphi_3$, ..., $\cos\varphi_n$;

особые условия — минимум стоимости, минимум массы, способ охлаждения и др.

1. Определение токов трансформатора

При определении тока первичной обмотки следует учитывать потери и намагничивающий ток трансформатора, относительная величина которых в малых силовых трансформаторах весьма значительна.

Величины токов могут быть определены по следующим формулам:

а) для однофазного трансформатора

$$I_1 = \frac{P}{U_1 \eta \cos\varphi_1};\ I_2 = \frac{P_2}{U_2};\ I_3 = \frac{P_3}{U_3};\ldots;\ I_n = \frac{P_n}{U_n};$$

б) для трехфазного трансформатора

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}\, U_1 \eta \cos\varphi_1};\ I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3}\, U_2};\ I_3 = \frac{P_3}{\sqrt{3}\, U_3};\ldots;\ I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}\, U_n},$$

где P — суммарная активная мощность вторичных обмоток трансформаторов, *вт*;

$$P = P_2 \cos\varphi_2 + P_3 \cos\varphi_3 + \ldots + P_n \cos\varphi_n;$$

$U_1, U_2, U_3, \ldots, U_n$ — заданные напряжения отдельных обмоток;

$P_2, P_3, \ldots, P_n$ — заданные мощности вторичных обмоток, *ва*;

$\cos\varphi_2, \cos\varphi_3, \ldots, \cos\varphi_n$ — заданные коэффициенты мощности нагрузок;

η — к. п. д., величина которого для малых трансформаторов до нескольких сотен вольт-ампер обычно находится в пределах $0{,}70 \div 0{,}93$.

Предварительная величина к. п. д. выбирается по кривой рис. 17.

Величина $\cos\varphi_1$ может быть определена по формуле

$$\cos\varphi_1 = \frac{I_{1а}}{\sqrt{I_{1а}^2 + I_{1р}^2}},$$

где активная и реактивная составляющие тока первичной обмотки определяются следующим образом:

а) для однофазного трансформатора

$$I_{1а} \approx \frac{P_2 \cos\varphi_2 + P_3 \cos\varphi_3 + \ldots + P_n \cos\varphi_n}{\eta U_1};$$

$$I_{1р} \approx I_\mu + \frac{P_2 \sin\varphi_2 + P_3 \sin\varphi_3 + \ldots + P_n \sin\varphi_n}{\eta U_1};$$

б) для трехфазного трансформатора

$$I_{1a} \approx \frac{P_2 \cos\varphi_2 + P_3 \cos\varphi_3 + \ldots + P_n \cos\varphi_n}{\sqrt{3}\,\eta U_1};$$

$$I_{1p} \approx \frac{I_{\mu 1} + 2I_{\mu 2}}{3} + \frac{P_2 \sin\varphi_2 + P_3 \sin\varphi_3 + \ldots + P_n \sin\varphi_n}{\sqrt{3}\,\eta U_1},$$

где $I_{\mu 1}$ и $I_{\mu 2}$ — намагничивающие токи в средней и крайней фазах трехфазного трансформатора.

В большинстве случаев нагрузка малых трансформаторов активная; в этом случае величина реактивной составляющей тока первичной обмотки практически определяется намагничивающим током I_μ и величина $\cos\varphi_1$ может быть получена из формулы

$$\cos\varphi_1 = \frac{I_{1a}}{\sqrt{I_{1a}^2 + I_\mu^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_\mu}{I_{1a}}\right)^2}}.$$

Рис. 17. Кривые зависимости к. п. д. и падения напряжения малых трансформаторов от мощности.

Предельное значение намагничивающего тока I_μ определяется величиной индукции в сердечнике трансформатора. Как известно, увеличение этой индукции уменьшает число витков обмоток, а следовательно, и расход материала на них. Вместе с тем уменьшается и стоимость трансформатора. Если в мощных трансформаторах пределом увеличения индукции являются магнитные потери в сердечнике и его нагрев, то в малых трансформаторах при 50 *гц* пределом увеличения индукции является величина намагничивающего тока. Возрастание этого тока вызывает необходимость увеличения сечения провода первичной обмотки, а следовательно, и массы материала ее, что уменьшает экономию материала, полученную за счет увеличения индукции. Пределом увеличения намагничивающего тока I_μ будет такое значение последнего, при котором перерасход обмоточных проводов за счет его

возрастания становится равным экономии этих проводов за счет увеличения индукции.

Как показывают расчет и опыт, для обычных малых трансформаторов с активной нагрузкой величина предельного значения намагничивающего тока I_μ может составлять около 40—50% от I_{1a}. При смешанной активной и индуктивной нагрузке предельное значение I_μ несколько. меньше.

Однако в специальных малогабаритных силовых трансформаторах малой мощности с высоким использованием активных материалов намагничивающий ток I_μ может достигать величины 80—90% от I_{1a}.

Средством снижения намагничивающего тока в обычных малых силовых трансформаторах может служить увеличение поперечного сечения ярма на 10—15% по сравнению с сечением стержня. В этом случае можно повысить предельное значение индукции в стержне на 10% с соответствующим снижением стоимости трансформатора.

2. Выбор индукции в стержне и ярме сердечника трансформатора

Допустимая величина индукции в стержне и ярме сердечника трансформатора определяется выбранным предельным значением намагничивающего тока и, кроме того, зависит от мощности, частоты питающей сети и типа трансформатора, числа стыков в сердечнике и его материала. Для трансформаторов с сердечником броневого типа из горячекатаной электротехнической стали марок Э41 и Э11, с числом стыков в сердечнике до двух и при намагничивающем токе I_μ до 40—50% от активной составляющей первичного тока I_{1a}, индукцию в стержне сердечника можно принять в пределах $B_c = 1{,}2 \div 1{,}3$ *тл*.

В трансформаторах броневого типа с увеличенным на 10—15% сечением ярма величина индукции в стержне может быть принята в пределах $B_c = 1{,}25 \div 1{,}35$ *тл*.

В малых трансформаторах стержневого типа с числом стыков в сердечнике до четырех величина индукции в стержне должна быть принята примерно на 5 — 10% меньше, чем у соответствующих трансформаторов броневого типа.

В силовых трансформаторах малой мощности с витыми разъемными сердечниками (рис. 8, *б*) применяется холоднокатаная электротехническая сталь с повышенной проницаемостью марок Э310, Э320 и Э330. В этом случае индукцию в стержне сердечника трансформаторов броневого и стержневого типов можно принимать в пределах $B_c = 1{,}55 \div 1{,}65$ *тл*.

В силовых трансформаторах повышенной частоты (400 *гц* и выше) величина индукции в стержне определяется величиной потерь и нагревом его. В этом случае для сердечника трансформатора используются электротехнические стали марок Э44, Э47, Э48 и Э340 с толщиной листа 0,35; 0,20; 0,15 и 0,10 *мм*. При этом индукция в стержне обычно составляет не более $0{,}5 \div 0{,}7$ *тл*.

3. Выбор плотности тока в проводах обмоток трансформатора

Допускаемая величина плотности тока в проводах обмоток трансформатора в значительной мере определяет массу и стоимость последнего. Чем выше плотность тока в обмотках, тем меньше масса материала их и соответственно стоимость трансформатора. С другой стороны, с увеличением плотности тока возрастают потери в обмотках и нагрев трансформатора.

Как указывалось в главе второй, материалом для обмоток трансформаторов малой мощности являются круглые медные и алюминиевые обмоточные провода различных марок по нагревостойкости, а также алюминиевая фольга в виде лент (Приложение I).

Чем меньше номинальная мощность трансформатора, тем лучше условия охлаждения его, а следовательно, и выше может быть допускаемая плотность тока в обмотках.

В трансформаторах мощностью примерно до 100 *ва* допускаемая плотность тока в проводах медных обмоток может составлять $j = 4{,}5 \div 3{,}5$ *а/мм²*.

В трансформаторах мощностью свыше 100 *ва* и до нескольких сотен вольт-ампер эта плотность обычно составляет $j = 2{,}5 \div 3{,}5$ *а/мм²*.

При температуре окружающей среды $+80 \div +150°$ С следует выбирать низкие пределы плотности тока.

Плотность тока j_a в проводах алюминиевых обмоток малых трансформаторов при прочих равных условиях принимается примерно в $1,4 \div 1,6$ раза меньше указанных значений для медных обмоток, чтобы не допустить увеличенных потерь энергии в них.

4. Определение поперечного сечения стержня и ярма сердечника трансформатора

Отношение потерь в катушках обмоток трансформатора к магнитным потерям в его сердечнике при частотах 50 и 400 *гц* следующее:

а) при медных обмотках

$$\beta = \frac{P_к}{P_с} = \frac{2k_\theta j^2 G_к}{k_с B_с^2 G_с} = \frac{2k_\theta}{k_с}\left(\frac{j}{B_с}\right)^2 \cdot \frac{1}{\alpha};$$

б) при алюминиевых обмотках

$$\beta = \frac{P_к}{P_с} = \frac{11k_\theta}{k_с}\left(\frac{j_а}{B_с}\right)^2 \cdot \frac{1}{\alpha}.$$

В малых силовых трансформаторах, работающих приблизительно при номинальных нагрузках, это отношение по условиям максимума к. п. д., как указывалось выше, желательно иметь в пределах $\beta = 1,2 \div 1,4$, однако в некоторых случаях эта величина может отличаться от указанных значений, а именно при частоте 50 *гц* $\beta = 2 \div 2,5$, а при частоте 400 *гц* $\beta \approx 0,9 \div 1,5$.

Отношение массы стали сердечника к массе материала обмоток составляет:

а) при медных обмотках

$$\alpha = \frac{G_с}{G_к} = \frac{2k_\theta}{k_с}\left(\frac{j}{B_с}\right)^2 \cdot \frac{1}{\beta};$$

б) при алюминиевых обмотках

$$\alpha = \frac{G_с}{G_к} = \frac{11k_\theta}{k_с}\left(\frac{j_а}{B_с}\right)^2 \cdot \frac{1}{\beta},$$

где $B_с$ берется из позиции 2, j — из позиции 3, $k_\theta = 1 + 0,004 \cdot (\vartheta - 20°)$ — коэффициент увеличения сопротивления обмотки трансформатора при повышении температуры ее от 20° С до ϑ° С.

Так, например, при температуре нагрева обмоток $\vartheta = 75°$ С этот коэффициент $k_\theta \approx 1,2$.

Удельные магнитные потери в стали сердечника k_c при $B=1$ *тл* и $f_1=50$ *гц*, по данным ГОСТа 802—58 (Приложение V), в зависимости от марки стали и толщины листа δ_c составляют

а) марка стали Э41:

при $\delta_c=0{,}35$ *мм* $k_c=1{,}35$ *вт/кг*;
при $\delta_c=0{,}50$ *мм* $k_c=1{,}60$ *вт/кг*;

б) марка стали Э11:

при $\delta_c=0{,}50$ *мм* $k_c=3{,}3$ *вт/кг*;

в) марка стали Э310:

при $\delta_c=0{,}35$ *мм* $k_c=1{,}00$ *вт/кг*;
при $\delta_c=0{,}50$ *мм* $k_c=1{,}25$ *вт/кг*.

Удельные магнитные потери в стали при $B=1$ *тл*, $f_1=400$ *гц* по указанному ГОСТу составляют

а) марка стали Э44:

при $\delta_c=0{,}35$ *мм* $k_c=19{,}0$ *вт/кг*;
при $\delta_c=0{,}20$ *мм* $k_c=12{,}5$ *вт/кг*;
при $\delta_c=0{,}10$ *мм* $k_c=10{,}5$ *вт/кг*;

б) марка стали Э340:

при $\delta_c=0{,}35$ *мм* $k_c=21{,}0$ *вт/кг*;
при $\delta_c=0{,}20$ *мм* $k_c=12{,}0$ *вт/кг*.

Как показывают расчет и опыт, отношение масс активных материалов при медных обмотках обычно находится в следующих пределах:

а) при минимуме стоимости трансформатора $\alpha = \frac{G_c}{G_к} = 4 \div 6$;

б) при минимуме массы $\alpha = \frac{G_c}{G_к} = 2 \div 3$.

В случае трансформаторов с алюминиевыми обмотками эти отношения получаются бо́льшими.

Поперечное сечение стержня сердечника трансформатора определяется по следующей формуле:

$$S_c' = C\sqrt{\frac{P_1 \alpha 10^2}{f_1 B_c j}}\ [см^2],$$

где $P_1=U_1I_1$ — потребляемая мощность однофазным трансформатором, *ва*; $P_1=\sqrt{3}U_1I_1$ — то же, трехфазным

трансформатором, *ва*; $\alpha = \frac{G_c}{G_к}$ — отношение массы стали к массе материала обмотки, определяется или по предыдущей формуле, или выбирается в зависимости от заданных технических условий; U_1 и f_1 — заданные первичное напряжение и частота, I_1 берется из позиции 1, B_c — из позиции 2, j — из позиции 3.

Постоянный коэффициент C для трансформаторов с медными обмотками в среднем может быть приближенно принят:

для однофазных трансформаторов стержневого типа с круглыми катушками . . . . $C = 0{,}5$;
то же, с прямоугольными катушками . . . . $C = 0{,}6$;
для однофазных трансформаторов броневого типа . . . $C = 0{,}7$;
для трехфазных трансформаторов стержневого типа с круглыми катушками . . . . $C = 0{,}37$;
то же, с прямоугольными катушками . . . . $C = 0{,}42$.

Для силовых трансформаторов с алюминиевыми обмотками эти коэффициенты, соответственно, примерно вдвое меньше указанных.

Поперечное сечение ярма трансформатора стержневого типа может быть принято в пределах

$$S'_я = (1{,}0 \div 1{,}15) \cdot S'_c \; [см^2].$$

Поперечное сечение ярма трансформатора броневого типа находится по формуле

$$S'_я = \frac{(1{,}0 \div 1{,}15)\, S'_c}{2} \left[см^2 \right].$$

Геометрические поперечные сечения стержня S_c и ярма $S_я$ сердечника с учетом коэффициента заполнения сечения сталью определяются следующим образом:

$$S_c = \frac{S'_c}{k_з}; \; S_я = \frac{S'_я}{k_з},$$

где $k_з$ — коэффициент заполнения сечения сердечника сталью, берется из табл. 3 в зависимости от принятой толщины листа δ_c.

Размеры сторон геометрического квадратного поперечного сечения стержня (рис. 18)

$$a = b = \sqrt{S_c} \; [см].$$

Возможно отступление от квадратной формы поперечного сечения стержня, при этом толщина пакета

$$b=(1,2 \div 1,8)\ a.$$

Высота ярма (рис. 18) определяется по формуле

$$h_я=\frac{S_я}{b}\ [см].$$

Окончательные размеры a, b и $h_я$ следует согласовать с рациональным раскроем стандартного листа стали 750 × 1500 или 1000 × 2000 *мм* для получения

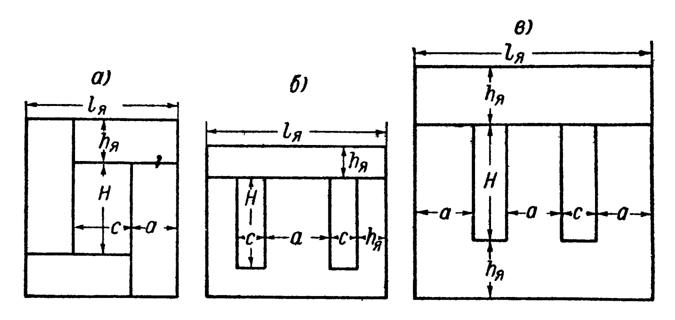


Рис. 18. Сердечники малых трансформаторов: *а* и *б* — форма пластин однофазных трансформаторов; *в* — Ш-образные пластины трехфазных трансформаторов.

минимальных отходов при штамповке или резке листа. Можно также выбрать ближайшую стандартную Ш-образную пластину сердечника броневого трансформатора из Приложений II, III и IV. В этом случае возможно отступление от квадратной формы поперечного сечения стержня для получения заданного сечения S_c, причем обычно $b \geqslant a$.

5. Определение числа витков обмоток трансформатора

Число витков первичной обмотки трансформатора может быть определено из выражения для э. д. с. обмоток трансформатора:

$$E_1 \approx U_1 - \frac{\Delta U}{2} = 4,44 f_1 B_c S_c' W_1 10^{-4}\ [в],$$

где $\frac{\Delta U}{2}=\frac{\Delta U\%\, U_1}{200}$ — падение напряжения в первичной обмотке; $\Delta U\%$ предварительно выбирается по кривой рис. 17 в зависимости от мощности трансформатора.

Тогда предварительное значение числа витков первичной обмотки однофазного трансформатора

$$W_1'=\frac{E_1\cdot 10^4}{4{,}44 f_1 B_c' S_c'}=\frac{\left(U_1-\frac{\Delta U\%\, U_1}{200}\right)\cdot 10^4}{4{,}44 f_1 B_c' S_c'},$$

где U_1 и f_1 — заданные первичное напряжение и частота; B_c' берется из позиции 2, S_c — из позиции 4.

Напряжение, приходящееся на один виток обмотки при нагрузке

$$e_w'=\frac{E_1}{W_1'}\ [в/виток].$$

Число витков вторичной обмотки

$$W_2'=\frac{E_2}{e_w'}=\frac{U_2+\frac{\Delta U\%\, U_2}{200}}{e_w'}.$$

Соответственно число витков третьей обмотки

$$W_3'=\frac{E_3}{e_w'}=\frac{U_2+\frac{\Delta U\%\, U_3}{200}}{e_w'}\ \text{и т. д.},$$

где U_2, U_3, ... — заданные вторичные напряжения.

Число витков обмотки низшего напряжения округляется до ближайшего целого числа с соответствующим пересчетом числа вольт на виток, величины индукции в стержне и чисел витков в других обмотках, а именно:

$$e_w=e_w'\frac{W_2'}{W_2}\ [в/виток];$$

$$W_1=W_1'\cdot\frac{W_2}{W_2'};\quad W_3=W_3'\cdot\frac{W_2}{W_2'}\ \text{и т. д.};$$

$$B_c=B_c'\cdot\frac{W_2'}{W_2}\ [тл],$$

где W_2 — число витков обмотки низшего напряжения, округленное до ближайшего целого числа.

Напряжения на вторичных обмотках при холостом ходе

$$U_{20}=E_2=e_w W_2\ [в];\qquad U_{30}=E_3=e_w W_3\ [в]\ \text{и т. д.}$$

Для трехфазного трансформатора определение числа витков производится на одну фазу:

$$W_1' = \frac{\left(U_1 - \frac{\Delta U\%\, U_1}{200}\right) \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 4{,}44 f_1 B_c' S_c'}; \quad e_w' = \frac{E_1}{W_1'} = \frac{U_1 - \frac{\Delta U\%\, U_1}{200}}{\sqrt{3}\, W_1'};$$

$$W_2' = \frac{E_2}{e_w'} = \frac{U_2 + \frac{\Delta U\%\, U_2}{200}}{\sqrt{3} \cdot e_w'}; \quad W_3' = \frac{U_3 + \frac{\Delta U\%\, U_3}{200}}{\sqrt{3} \cdot e_w'} \text{ и т. д.}$$

6. Определение сечения и диаметра проводов обмоток

Предварительные значения поперечных сечений проводов обмоток определяются по формулам:

$$q_1' = \frac{I_1}{j_1'} \; [мм^2]; \quad q_2' = \frac{I_2}{j_2'} \; [мм^2]; \quad q_3' = \frac{I_3}{j_3'} \; [мм^2] \text{ и т. д.,}$$

где I_1, I_2, I_3, ... берутся из позиции 1, j_1', j_2', j_3', ... — из позиции 3.

Окончательные значения поперечных сечений и диаметров проводов выбираются по ближайшим данным ГОСТа из Приложения I:

$$q_1 = \ldots [мм^2]; \quad d_1/d_{1и} = \ldots [мм]; \quad q_2 = \ldots [мм^2];$$

$$d_2/d_{2и} = \ldots [мм]; \quad q_3 = \ldots [мм^2]; \quad d_3/d_{3и} = \ldots [мм] \text{ и т. д.}$$

По выбранным окончательно сечениям проводов уточняются плотности тока в проводах обмоток:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1} \ldots [а/мм^2]; \quad j_2 = \frac{I_2}{q_2} \ldots [а/мм^2];$$

$$j_3 = \frac{I_3}{q_3} \ldots [а/мм^2] \text{ и т. д.}$$

При сечении проводов $q > 10$ $мм^2$ обмотку трансформатора следует выполнять проводом прямоугольной формы или же при круглом проводе выполнять намотку обмотки в два-три параллельных провода.

7. Выбор изоляции проводов обмоток

Размеры и марка изоляции проводов для обмоток трансформаторов определяются государственными общесоюзными стандартами (ГОСТами). Марки проводов,

применяемые в малых трансформаторах, указаны в Приложении I.

Выбор марки изоляции проводов для обмоток силовых трансформаторов малой мощности зависит от области применения и условий работы трансформаторов, а также от требований к ним в отношении теплового режима.

В главе второй, в разделе „Обмоточные провода“ дана расшифровка различных марок по ГОСТу и ТУ (Приложение I) и их принадлежность к соответствующим классам изоляции по нагревостойкости. Вместе с этим там же указываются возможные области применения отдельных марок обмоточных проводов в рассматриваемых трансформаторах в зависимости от требований надежности, механической прочности, стоимости и теплостойкости трансформаторов.

8. Определение высоты и ширины окна сердечника трансформатора

Форма окна сердечника трансформатора оказывает значительное влияние на величину намагничивающего тока, расход стали на сердечник и материала на обмотки трансформатора. Излишняя высота окна сердечника H повышает намагничивающий ток I_{μ} и увеличивает расход стали и массу трансформатора. Заниженная высота окна повышает нагрев обмотки и увеличивает расход материала на них.

Как показывает опыт, наивыгоднейшая форма окна сердечника трансформатора получается при отношении высоты окна к его ширине в пределах 2,0 ÷ 3,0 (рис. 18).

Если при расчете сердечника трансформатора броневого типа принята стандартная форма Ш-образных пластин из Приложений II, III и IV, то размеры H и c (рис. 18) берутся из этих же Приложений.

При произвольном выборе размеров сердечника a, b и $h_я$ предварительное значение высоты окна сердечника трансформатора может быть определено по формуле:

$$H = \sqrt{k \cdot \frac{(q_1 W_1 + q_2 W_2 + q_3 W_3 + \ldots + q_n W_n)}{100 k_{ок}}}\ [см],$$

где k — отношение высоты окна сердечника к ширине, $k = \frac{H}{c} = 2{,}0 \div 3{,}0$; $k_{ок}$ — коэффициент заполнения окна

сердечника обмоткой; для малых силовых трансформаторов величина $k_{ок}$ приближенно может быть принята в пределах $k_{ок}=0,2\div0,4$, в среднем же можно положить $k_{ок}\approx0,26$; W_1, W_2, W_3, ... берутся из позиции 5, q_1, q_2, q_3, ... — из позиции 6. Ширина окна сердечника предварительно определяется по формуле

$$c=\frac{H}{k}\ [см].$$

Полученные здесь предварительные значения H и c окончательно уточняются при укладке обмоток на стержне сердечника трансформатора в позиции 9.

Если проектируется силовой трансформатор малой мощности с оптимальными геометрическими размерами для обеспечения минимального значения одного из его удельных технико-экономических показателей — массы, объема или стоимости, то для определения ширины окна трансформатора c нужно воспользоваться одним из уравнений (14) или (15), или же (16). Тогда оптимальная ширина окна будет

$$c=x_0a\ [см],$$

где a — ширина стержня сердечника, *см* (берется из позиции 4).

9. Укладка обмоток на стержнях и уточнение размеров окна сердечника трансформатора

При расположении обмоток на стержнях сердечника трансформатора нужно иметь в виду, что чем меньше диаметр обмоточного провода, тем выше его стоимость, поэтому для уменьшения общей стоимости трансформатора целесообразно обмотку с более тонким проводом располагать на стержне первой.

В случае трехобмоточных трансформаторов, в целях уменьшения взаимного влияния вторичных обмоток друг на друга при изменении нагрузки в них желательно первичную обмотку располагать на стержне между вторичными обмотками. Однако в малых силовых трансформаторах индуктивные сопротивления обмоток весьма незначительны, и их влияние на падение напряжения в трансформаторе при нагрузке невелико.

Ввиду этого в рассматриваемых трансформаторах практически можно отступать от теоретического положения размещения первичной обмотки на стержне между вторичными и размещать их в зависимости от конструктивных и других соображений.

Для уточнения ширины окна сердечника c необходимо вычислить радиальную толщину обмоток трансформатора. Число витков первичной обмотки в одном слое

$$n_1 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{1и}},$$

где $d_{1и}$ берется из позиции 6; H — из позиции 8; ε — расстояние от обмотки до ярма, обычно $\varepsilon_1 = 2 \div 5$ *мм*.

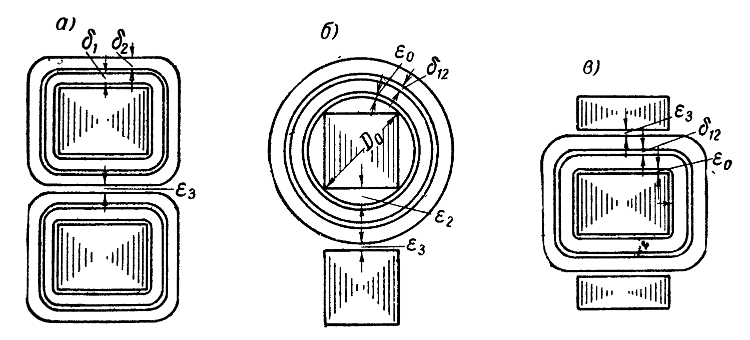


Рис. 19. Формы катушек малых однофазных двухобмоточных трансформаторов: *а* — стержневого двухкатушечного; *б* — стержневого однокатушечного; *в* — броневого.

В случае применения в броневом трансформаторе штампованных листов с одним зазором длина катушек по условиям сборки должна быть меньше длины стержня на 5 — 10%. В таком случае число витков в слое следует вычислять по формуле

$$n_1 \approx 0,9\frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{1и}}.$$

Число слоев первичной обмотки однофазного однокатушечного или броневого трансформаторов (рис. 19, *б* и *в*) $m_1 \approx \frac{W_1}{n_1}$; полученное значение m_1 округляется до ближайшего большего целого числа.

В случае однофазного двухкатушечного трансформатора стержневого типа (рис. 19, *а*) число витков на стержне будет $\frac{W_1}{2}$.

Толщина первичной обмотки $\delta_1 = m_1 (d_{1и} + \gamma_1)$, где γ_1 — толщина изоляционной прокладки между слоями; $d_{1и}$ берется из позиции 6.

Изоляционные прокладки следует применять лишь при напряжении между слоями свыше 50 *в*. Толщина изоляционных прокладок обычно не превышает 0,05 ÷ ÷ 0,08 *мм*.

Число витков вторичной обмотки в одном слое

$$n_2 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{2и}}.$$

Число слоев вторичной обмотки однофазного однокатушечного или броневого трансформаторов (рис. 19, *б* и *в*) $m_2 = \frac{W_2}{n_2}$; полученное значение m_2 также округляется до ближайшего бóльшего целого числа.

В однофазном двухкатушечном трансформаторе стержневого типа (рис. 19, *а*) число витков на стержне равно $\frac{W_2}{2}$.

Толщина вторичной обмотки $\delta_2 = m_2 (d_{2и} + \gamma_2)$, где $d_{2и}$ берется из позиции 6; $\gamma_2 = \gamma_1$.

В случае трансформатора с тремя и более обмотками толщина обмоток вычисляется аналогичным образом.

Ширина окна сердечника однофазного трансформатора с одной круглой катушкой (рис. 19, *б*)

$$c = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \delta_{3n} + \ldots + \delta_n + \varepsilon_3,$$

где $\varepsilon_2 = \frac{D_0 - a}{2}$ — зазор от стержня до катушки (рис. 19, *б*); $\varepsilon_0 = 1{,}0 \div 2{,}0$ *мм* — толщина изоляции между катушкой и стержнем, выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824—60); $\delta_{12}, \delta_{23}, \ldots, \delta_{3n}$ — толщина изоляции между обмотками, выполняемой в малых трансформаторах обычно из электрокартона ЭВ толщиной 0,50—1,0 *мм* (ГОСТ 2824—60); ε_3 — расстояние от катушки до второго стержня, принимаемое обычно в пределах $\varepsilon_3 = 3 \div 5$ *мм*; $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \ldots, \delta_n$ — толщины соответствующих обмоток в миллиметрах.

Ширина окна однофазного трансформатора с двумя круглыми катушками, а также трехфазного трансформатора с аналогичными катушками (рис. 19, *а*)

$$c = 2(\varepsilon_0 + \varepsilon_2 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \delta_{3n} + \ldots + \delta_n) + \varepsilon_3,$$

где ε_3 — расстояние между катушками, обычно $\varepsilon_3 = 3 \div 5$ *мм*.

Ширина окна однофазного трансформатора с одной прямоугольной катушкой (рис. 19, *в*)

$$c = k_2(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \delta_{3n} + \ldots + \delta_n) + \varepsilon_3,$$

где k_2 — коэффициент увеличения толщины катушки за счет неплотностей прилегания слоев, в результате чего катушка приобретает овальную форму. Величина этого коэффициента зависит от упругости проволоки и натяжения ее при намотке; ориентировочно можно принять $k_2 = 1{,}2 \div 1{,}3$.

Ширина окна однофазного трансформатора с двумя прямоугольными катушками, а также трехфазного трансформатора с аналогичными катушками

$$c = 2k_2(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \delta_{3n} + \ldots + \delta_n) + \varepsilon_3.$$

Проверка правильности выбранных величин H и c производится по их отношению:

$$k = \frac{H}{c} = 2{,}0 \div 3{,}0,$$

если полученное отношение $\frac{H}{c}$ выходит за указанные пределы, следует соответственно изменить высоту окна H, снова проверить укладку обмотки и определить новое значение ширины окна c.

10. Масса материала обмоток трансформатора

Масса медных обмоток трансформаторов определяется по следующим формулам:

а) для однофазного трансформатора

$$G_{к1} = 8{,}9\, W_1 q_1 \cdot l_{w1} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$
$$G_{к2} = 8{,}9\, W_2 q_2 \cdot l_{w2} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$
$$G_{к3} = 8{,}9\, W_3 q_3 \cdot l_{w3} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

. . . .

$$G_{кn} = 8{,}9\, W_n q_n \cdot l_{wn} \cdot 10^{-5} \text{ [кг]};$$

б) для трехфазного трансформатора

$$G_{к1}=3\cdot 8{,}9\, W_1 q_1\cdot l_{w1}\cdot 10^{-5}\ [кг];$$
$$G_{к2}=3\cdot 8{,}9\, W_2 q_2\cdot l_{w2}\cdot 10^{-5}\ [кг];$$
$$G_{к3}=3\cdot 8{,}9\, W_3 q_3\cdot l_{w3}\cdot 10^{-5}\ [кг];$$

. . . .

$$G_{кn}=3\cdot 8{,}9\, W_n q_n\cdot l_{wn}\cdot 10^{-5}\ [кг].$$

Общая масса медных обмоток

$$G_к=G_{к1}+G_{к2}+G_{к3}+\ldots+G_{кn}\qquad [кг].$$

В случае алюминиевых обмоток трансформаторов нужно для определения их массы заменить в приведенных формулах коэффициент 8,9 на 2,7.

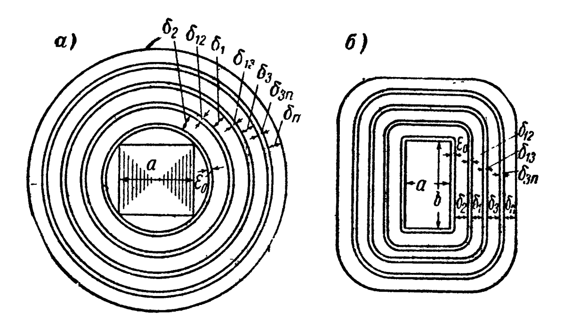


Рис. 20. Формы катушек малых многообмоточных трансформаторов: *а* — круглые; *б* — прямоугольные.

В приведенных формулах W_1, W_2, $W_3, \ldots$ берутся из позиции 5, q_1, q_2, $q_3, \ldots$ — из позиции 6; l_w — средняя длина витка обмотки в сантиметрах, определяемая следующим образом:

а) в случае круглых катушек обмоток (рис. 20, *а*)

$$l_{w1}=\pi\,(a\sqrt{2}+2\varepsilon_0+2\delta_2+2\delta_{12}+\delta_1)\ [см];$$
$$l_{w2}=\pi\,(a\sqrt{2}+2\varepsilon_0+\delta_2)\ [см];$$
$$l_{w3}=\pi\,(a\sqrt{2}+2\varepsilon_0+2\delta_2+2\delta_{12}+2\delta_1+2\delta_{13}+\delta_3)\ [см];$$

. . . .

$$l_{wn}=\pi\,(a\sqrt{2}+2\varepsilon_0+2\delta_2+2\delta_{12}+2\delta_1+2\delta_{13}+ +2\delta_3+2\delta_{3n}+\ldots+\delta_n)\ [см];$$

б) в случае прямоугольных катушек обмоток (рис. 20, *б*):

$$l_{w1} \approx 2[a+b+4(\varepsilon_0+\delta_2+\delta_{12})+2\delta_1] \ [см];$$
$$l_{w2} \approx 2(a+b+4\varepsilon_0+2\delta_2) \ [см];$$
$$l_{w3} \approx 2[a+b+4(\varepsilon_0+\delta_2+\delta_{12}+\delta_1+\delta_{13})+2\delta_3] \ [см];$$
. . . .
$$l_{wn} \approx 2[a+b+4(\varepsilon_0+\delta_2+\delta_{12}+\delta_1+\delta_{13}+\delta_3+\delta_{3n}+ +\ldots)+2\delta_n] \ [см],$$

где a и b берутся из позиции 4, δ_1, δ_2, $\delta_3, \ldots$ — из позиции 9.

11. Потери в обмотках трансформатора при 75° С

Потери в обмотках трансформатора при 75° С определяются по следующим формулам:

для медной обмотки

$$P_к = 2{,}4j^2G_к \ [вт];$$

для алюминиевой обмотки

$$P_к = 13{,}2j_a^2G_к \ [вт],$$

где j — плотность тока соответствующей обмотки, *а/мм*², определяемая из позиции 6; $G_к$ — вес (масса) материала соответствующей обмотки в *кг*, определяемый из позиции 10; числовые коэффициенты 2,4 — удельные потери в меди и 13,2 — удельные потери в алюминии в *вт/кг·а/мм*² при условной температуре нагрева 75° С; при другой температуре нагрева ϑ эти потери нужно умножить на отношение $\frac{1+0{,}004(\vartheta-20)}{1{,}22}$.

Потери вычисляются для каждой обмотки трансформатора отдельно.

Суммарные потери в обмотках трансформатора

$$P_к = P_{к1}+P_{к2}+P_{к3}+\ldots+P_{кn} \ [вт].$$

12. Масса материала сердечника трансформатора

Масса стали сердечника трансформатора определяется следующим образом:

а) для однофазного трансформатора стержневого типа (рис. 18, *а*)

масса стержней $G_{с.с} = 2\cdot 7{,}6\,HS'_с\cdot 10^{-3}$ [*кг*];

масса ярем $G_{с.я} = 2\cdot 7{,}6\cdot l_я\cdot S'_я\cdot 10^{-3}$ [*кг*];

б) для однофазного трансформатора броневого типа (рис. 18, *б*)

масса стержня $G_{с.с} = 7{,}6\, HS'_{с} \cdot 10^{-3}$ [*кг*];
масса ярем $G_{с.я} = 2 \cdot 7{,}6\,(H + l_{я})\, S'_{я} \cdot 10^{-3}$ [*кг*];

в) для трехфазного трансформатора (рис. 18, *в*)

масса стержней $G_{с.с} = 3 \cdot 7{,}6\, HS'_{с} \cdot 10^{-3}$ [*кг*];
масса ярем $G_{с.я} = 2 \cdot 7{,}6\, l_{я} \cdot S'_{я} \cdot 10^{-3}$ [*кг*].

Общая масса сердечника трансформатора

$$G_{с} = G_{с.с} + G_{с.я} \text{ [кг]}.$$

Длины ярем различных сердечников будут равны:

для рис. 18, *а*: $l_{я} = c + 2a$ [*см*];
для рис. 18, *б*: $l_{я} = 2c + a + 2h_{я}$ [*см*];
для рис. 18, *в*: $l_{я} = 2c + 3a$ [*см*],

где $S'_{с}$, $S'_{я}$, a и b берутся из позиции 4, H и c — из позиции 8 или 9.

В случае изготовления сердечника трансформатора из пермаллоя нужно для определения его массы заменить в приведенных формулах числовой коэффициент 7,6 на 8,2 — для марки 50Н и на 8,5 — для марки 79НМ. При ферритовом сердечнике этот коэффициент равен 4,6.

13. Магнитные потери в сердечнике трансформатора

Магнитные потери в стержнях сердечника

$$P_{с.с} = k_{с} B_{с}^{2} \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot G_{с.с} \text{ [вт]}.$$

Магнитные потери в ярмах

$$P_{с.я} = k_{с} B_{я}^{2} \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot G_{с.я} \text{ [вт]}.$$

Полные магнитные потери в сердечнике трансформатора

$$P_{с} = P_{с.с} + P_{с.я} \text{ [вт]}.$$

В записанных формулах $B_{с}$ и $B_{я}$ берутся из позиции 2, $k_{с}$ — из позиции 4.

В силовых трансформаторах повышенной частоты (400 *гц* и выше), при применении для сердечников электротехнических сталей марок Э44 и Э340, магнитные потери в них удобнее определять по формуле:

$$P_{c}=k_{c}B^{2}\left(\frac{f_{1}}{400}\right)^{1,3}\cdot G_{c}\ [вт],$$

где B и G_{c} берутся соответственно для стержней и ярем сердечника.

14. Определение тока холостого хода трансформатора

Ток холостого хода трансформатора

$$I_{0}=\sqrt{I_{0а}^{2}+I_{\mu}^{2}}\approx I_{\mu},$$

где $I_{0а}$ — активная составляющая тока холостого хода; I_{μ} — реактивная составляющая его, или намагничивающий ток.

Активная составляющая тока холостого хода зависит от магнитных потерь в сердечнике и потерь от тока холостого хода в первичной обмотке трансформатора. Она относительно мала по сравнению с намагничивающим током и ею при расчете тока холостого хода малого трансформатора практически можно пренебречь. Намагничивающий ток здесь может быть определен по формуле

$$I_{\mu}=\frac{aw_{c}l'_{c}+aw_{я}l'_{я}+0{,}8\,Bn\delta_{э}\cdot 10^{4}}{\sqrt{2}\cdot W_{1}},$$

где $\delta_{э}\doteq 0{,}004$ *см* — величина эквивалентного воздушного зазора в сердечнике трансформатора; n — число зазоров в сердечнике: в однофазном стержневом трансформаторе n равно 4 или 2, в однофазном броневом трансформаторе из штампованных листов n равно 2 или 1, в трехфазном трансформаторе n равно 2 или 1; aw_{c} и $aw_{я}$ — удельные м. д. с. в стержне и ярме трансформатора в соответствии с индукциями B_{c} и $B_{я}$, определяемые по кривым рис. 42; W_{1} — число витков первичной обмотки из позиции 5; l'_{c} — средняя длина пути магнитного потока в стержнях трансформатора: 1) для однофазного стержневого трансформатора (рис. 8, *а*) $l'_{c}=2H$ [*см*]; 2) для однофазного броневого и трехфазного трансфор-

матора (рис. 18, *б* и *в*) $l'_с = H$ [*см*]; $l'_я$ — средняя длина пути магнитного потока в ярмах трансформатора: 1) для однофазного стержневого трансформатора $l'_я = 2l_я$ [*см*]; 2) для однофазного броневого трансформатора $l'_я = H + l_я$ [*см*]; для крайней фазы трехфазного трансформатора $l'_я = l_я$ [*см*]; для средней фазы трехфазного трансформатора $l_я = 0$; H — высота окна сердечника из позиции 8 или 9; $l_я$ — из позиции 12.

Величина тока холостого хода трехфазного трансформатора определяется как среднее арифметическое из токов трех фаз.

15. Коэффициент полезного действия трансформатора

Величина к. п. д. при номинальной нагрузке может быть определена по формуле

$$\eta = \frac{P}{P + P_с + P_к} \cdot 100.$$

К. п. д. при частичной нагрузке γP приближенно может быть определен по формуле

$$\eta \approx \frac{\gamma P}{\gamma P + P_с\left(1 + \frac{\Delta U\%}{200} - \gamma\frac{\Delta U\%}{200}\right)^2 + \gamma^2 (P_к - I_\mu^2 r_1) + I_\mu^2 r_1} \cdot 100,$$

где P берется из позиции 1, $\Delta U\%$ — из позиции 5, $P_к$ — из позиции 11, $P_с$ — из позиции 13, I_μ — из позиции 14; r_1 — активное сопротивление первичной обмотки из позиции 16; γ — коэффициент, характеризующий отношение данной нагрузки трансформатора к номинальной.

16. Активные падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора

Относительное активное падение напряжения в первичной обмотке однофазного трансформатора при номинальной нагрузке всех вторичных обмоток

$$e_{а1}\% = \frac{P_{к1}}{U_1 I_1} 100.$$

Относительные активные падения напряжения во вторичных обмотках при номинальных нагрузках

определяются по формулам:

$$e_{a2}\% = \frac{P_{к2}}{U_2 I_2} 100;$$

$$e_{a3}\% = \frac{P_{к3}}{U_3 I_3} 100; \ldots; e_{an}\% = \frac{P_{кn}}{U_n I_n} 100.$$

В случае трехфазного трансформатора правые части этих формул нужно разделить на $\sqrt{3}$.

Активные сопротивления обмоток однофазного трансформатора определяются по следующим формулам:

$$r_1 = \frac{P_{к1}}{I_1^2} [ом]; \quad r_2 = \frac{P_{к2}}{I_2^2} [ом]; \quad r_3 = \frac{P_{к3}}{I_3^2} [ом]; \ldots; r_n = \frac{P_{кn}}{I_n^2} [ом].$$

В случае трехфазного трансформатора правые части этих формул нужно разделить на 3.

Активное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора, приведенное к первой обмотке, равно

$$r_к = r_1 + r_2' = r_1 + r_2 \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 [ом].$$

Активные сопротивления короткого замыкания пар обмоток многообмоточного трансформатора, приведенные к первой обмотке, определяются по следующим формулам:

$$r_{к12} = r_1 + r_2' = r_1 + r_2 \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 [ом];$$

$$r_{к13} = r_1 + r_3' = r_1 + r_3 \left(\frac{W_1}{W_3}\right)^2 [ом];$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$r_{к1n} = r_1 + r_n' = r_1 + r_n \left(\frac{W_1}{W_n}\right)^2 [ом],$$

где U_1, U_2, U_3, ... берутся из задания, I_1, I_2, I_3, ... — из позиции 1, W_1, W_2, W_3, ... — из позиции 5, $P_{к1}$, $P_{к2}$, $P_{к3}$, ... — из позиции 11.

17. Индуктивные падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора

Относительные индуктивные падения напряжения в отдельных обмотках двухобмоточного трансформатора

$$e_{s1}\% = \frac{4 f_1 I_1 W_1 \delta_{s12} l_{w1} 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$e_{s2}\% = \frac{4 f_1 I_2 W_2 \delta_{s12} l_{w2} 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$e_s\% = e_{s1}\% + e_{s2}\%.$$

Относительные индуктивные падения напряжения пар обмоток многообмоточного трансформатора, отнесенные к мощности первой обмотки, при расположении последней на стержне между вторичными (рис. 21):

$$e_{s12}\% = \frac{4f_1\left(l_1 W_1 l_{w1} + l_2 W_2 l_{w2}\frac{P_1}{P_2}\right)\delta_{s12}\cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$e_{s13}\% = \frac{4f_1\left(l_1 W_1 l_{w1} + l_3 W_3 l_{w3}\frac{P_1}{P_3}\right)\delta_{s13}\cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

. . . .

$$e_{s1n}\% = \frac{4f_1\left(l_1 W_1 l_{w1} + l_n W_n l_{wn}\frac{P_1}{P_n}\right)\delta_{s1n}\cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

$$e_{s23}\% = \frac{4f_1\left(l_2 W_2 l_{w2}\frac{P_1}{P_2} + l_3 W_3 l_{w3}\frac{P_1}{P_3}\right)\delta_{s23}\cdot 10^{-6}}{e_w l_s};$$

. . . .

$$e_{s2n}\% = \frac{4f_1\left(l_2 W_2 l_{w2}\frac{P_1}{P_2} + l_n W_n l_{wn}\frac{P_1}{P_n}\right)\delta_{s2n}\cdot 10^{-6}}{e_w l_s}.$$

Индуктивные падения напряжения отдельных обмоток многообмоточного трансформатора следующие:

а) пара обмоток 1 и 2

$$e_{s1}\% = \frac{4f_1 l_1 W_1 l_{w1}\delta_{s12}\cdot 10^{-6}}{e_w l_s};\quad e_{s2}\% = e_{s12}\% - e_{s1}\%;$$

б) пара обмоток 1 и 3

$$e'_{s1}\% = \frac{4f_1 l_1 W_1 l_{w1}\delta_{s13}\cdot 10^{-6}}{e_w l_s};\quad e_{s3}\% = e_{s13}\% - e'_{s1}\%;$$

. . . .

в) пара обмоток 1 и n

$$e^{n}_{sn}\% = \frac{4f_1 l_1 W_1 l_{w1}\delta_{s1n}\cdot 10^{-6}}{e_w l_s};\quad e_{sn}\% = e_{s1n}\% - e^{n}_{sn}\%,$$

где $\delta_{s12} = \delta_{12} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3}$ [*см*];

$$\delta_{s13} = \delta_{13} + \frac{\delta_1 + \delta_3}{3}\ [см];$$

. . . .

$$\delta_{s1n} = \delta_{13} + \delta_3 + \ldots + \delta_{3n} + \frac{\delta_1 + \delta_n}{2}\ [см];$$

. . . .

$$\delta_{s2n} = \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{13} + \delta_3 + \ldots + \delta_{3n} + \frac{\delta_2 + \delta_n}{3}\ [см];$$

f_1, P_2, $P_3, \ldots$ — заданные частота и мощности вторичных обмоток, *ва*; $P_1 = U_1 I_1$ — первичная мощность трансформатора, *ва*; I_1, I_2, $I_3, \ldots$ — берутся из позиции 1; e_w, W_1, W_2, $W_3, \ldots$ — из позиции 5; δ_1, δ_2, δ_3, ..., δ_{12}, δ_{13}, $\delta_{23}, \ldots$ — из позиции 9; l_{w1}, l_{w2}, $l_{w3}, \ldots$ — из позиции 10; $l_s \approx H$ — длина пути магнитных линий рассеяния, *см*.

Индуктивное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора, приведенное к первой обмотке,

$$x_к = x_1 + x_2' = \frac{e_s\% U_1}{100 I_1} \ [ом].$$

Индуктивные сопротивления короткого замыкания пар обмоток многообмоточного трансформатора, приведенные к первичной обмотке, определяются по следующим формулам:

$$x_{к12} = x_1 + x_2' = \frac{e_{s12}\% U_1}{100 I_1} \ [ом];$$
$$x_{к13} = x_1' + x_3' = \frac{e_{s13}\% U_1}{100 I_1} \ [ом];$$

. . . .

$$x_{к1n} = x_1^n + x_n' = \frac{e_{sn1}\% U_1}{100 I_1} \ [ом].$$

18. Полные сопротивления и напряжения короткого замыкания обмоток трансформатора

Полное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора

$$z_к = \sqrt{r_к^2 + x_к^2} \ [ом].$$

Полные сопротивления короткого замыкания пар обмоток многообмоточного трансформатора определяются по следующим формулам:

$$z_{к12} = \sqrt{r_{к12}^2 + x_{к12}^2} \ [ом];$$
$$z_{к13} = \sqrt{r_{к13}^2 + x_{к13}^2} \ [ом];$$

. . . .

$$z_{к1n} = \sqrt{r_{к1n}^2 + x_{к1n}^2} \ [ом].$$

Напряжение короткого замыкания двухобмоточного трансформатора

$$e_к\% = \frac{z_к I_1}{U_1} 100.$$

Напряжения короткого замыкания пар обмоток многообмоточного трансформатора

$$e_{к12}\% = \frac{z_{к12} I_1}{U_1} 100;$$
$$e_{к13}\% = \frac{z_{к13} I_1}{U_1};$$
$$\cdots\cdots$$
$$e_{к1n}\% = \frac{z_{к1n} I_1}{U_1} 100,$$

где U_1 берется из задания, I_1 — из позиции 1, $r_к$, $r_{к12}$, $r_{к13}$, ... — из позиции 16, $x_к$, $x_{к12}$, $x_{к13}$, ... — из позиции 17.

В случае трехфазного трансформатора правые части выражений для $e_к\%$, $e_{к12}\%$, ... нужно умножить на $\sqrt{3}$.

19. Изменение напряжения трансформатора при нагрузке

Величина относительного изменения напряжения в двухобмоточных трансформаторах большой мощности обычно определяется по формуле:

$$\Delta U\% = e_a \cos\varphi_2 + e_s \sin\varphi_2 + \frac{(e_s \cos\varphi_2 - e_a \sin\varphi_2)^2}{200}.$$

При выводе этой формулы принято допущение: $\cos\varphi_1 \approx \cos\varphi_2$, что в мощных трансформаторах с относительно небольшим током холостого хода не вносит большой погрешности в вычисляемую по этой формуле величину $\Delta U\%$. В трансформаторах малой мощности, по условиям уменьшения их стоимости, величина намагничивающего тока достигает 40—50% от активной составляющей рабочего тока, поэтому приведенная выше формула для определения $\Delta U\%$ становится в этом случае весьма неточной. В этих трансформаторах величина $\Delta U\%$ более точно может быть определена по следующим формулам:

а) для двухобмоточного трансформатора

$$\Delta U\% \approx e_{a1} \cos\varphi_1 + e_{a2} \cos\varphi_2 + e_{s1} \sin\varphi_1 + e_{s2} \sin\varphi_2;$$

б) для многообмоточного трансформатора

$$\Delta U_{12}\% \approx e_{a1} \cos\varphi_1 + e_{a2} \cos\varphi_2 + e_{s1} \sin\varphi_1 + e_{s2} \sin\varphi_2;$$
$$\Delta U_{13}\% \approx e_{a1} \cos\varphi_1 + e_{a3} \cos\varphi_3 + e'_{s1} \sin\varphi_1 + e_{s3} \sin\varphi_3;$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$\Delta U_{1n}\% \approx e_{a1} \cos\varphi_1 + e_{an} \cos\varphi_n + e^{n}_{s1} \sin\varphi_1 + e_{sn} \sin\varphi_n,$$

где $\cos\varphi_2$, $\cos\varphi_3$, ... берутся из задания, $\cos\varphi_1$ — из позиции 1, e_{a1}, e_{a2}, e_{a3}, ... — из позиции 16, e_{s1}, e'_{s1}, e_{s2}, e_{s3}, ... — из позиции 17.

Напряжения на зажимах вторичных обмоток трансформатора при номинальной нагрузке определяются по следующим формулам:

$$U_2 = U_1 \frac{W_2}{W_1}\left(1 - \frac{\Delta U_{12}\%}{100}\right);$$

$$U_3 = U_1 \frac{W_3}{W_1}\left(1 - \frac{\Delta U_{13}\%}{100}\right);$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$U_n = U_1 \frac{W_n}{W_1}\left(1 - \frac{\Delta U_{1n}\%}{100}\right),$$

где U_1 берется из задания, W_1, W_2, W_3, ... — из позиции 5.

20. Проверка трансформатора на нагревание

Как показывают расчет и опыт, коэффициент теплоотдачи в окружающее пространство от открытых частей обмоток и сердечника малых силовых трансформаторов находится в пределах $(20 \div 10) \cdot 10^{-4}$ *вт/см²*, с учетом этого коэффициента приближенно можно написать:

$$P_{к} \approx (20 \div 10) \cdot 10^{-4} \theta_{к}^{\circ} S_{обм};$$

$$P_{с} \approx (20 \div 10) \cdot 10^{-4} \theta_{с}^{\circ} S_{сер}.$$

Так как между обмотками и сердечником имеется достаточный тепловой обмен, то без большой погрешности практически можно считать, что

$$\theta_{к}^{\circ} \approx \theta_{с}^{\circ}.$$

Следовательно, превышение температуры обмоток и сердечника трансформатора над температурой окружающей среды при указанном допущении приближенно можно определить по формуле:

$$\theta \approx \frac{P_{к} + P_{с}}{(20 \div 10) \cdot 10^{-4} (S_{обм} + S_{сер})} + \Delta\theta^{\circ} \ [^{\circ}C],$$

где $P_{к}$ — суммарные потери в обмотках трансформатора из позиции 11;

$P_{с}$ — магнитные потери в его сердечнике из позиции 13;

$\Delta\theta^{\circ}$ — перепад температуры от внутренних слоёв обмоток к наружным, который для пропитанных лаком обмоток приближенно может быть принят в пределах $10 \div 15^{\circ}$ C;

$S_{сер}$ — открытая поверхность сердечника трансформатора, $см^2$;

$S_{обм}$ — открытая поверхность обмоток трансформатора, $см^2$.

Величина открытой поверхности сердечника однофазного и трехфазного трансформаторов стержневого типа (рис. 18) может быть определена по формуле

$$S_{сер} \approx 2(b + 2h_я) l_я + 4bh_я \quad [см^2].$$

Для однофазного трансформатора броневого типа (рис. 18) эта поверхность будет

$$S_{сер} \approx 2(b + 2h_я) l_я + 4(b + h_я) \cdot H + 4bh_я \quad [см^2].$$

Величина открытой поверхности круглой катушки

$$S_{обм} \approx \pi D_{нар} \cdot H \quad [см^2].$$

Для прямоугольной катушки

$$S_{обм} \approx$$
$$\approx 2[a + b + 4(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \ldots)] \cdot H \quad [см^2],$$

где

$$D_{нар} = a\sqrt{2} + 2(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3 + \ldots) \quad [см],$$

a, b и $h_я$ берутся из позиции 4, H — из позиции 8, ε_0, δ_1, δ_2, δ_3, δ_{12}, δ_{23}, ... — из позиции 9, $l_я$ — из позиции 12.

Суммарное значение полученного здесь превышения температуры обмоток трансформатора θ°C вместе с температурой окружающей среды $\vartheta_{о.ср}$ °C не должно превосходить допустимой для малых трансформаторов величины в соответствии с выбранным при расчете классом изоляции по нагревостойкости. Так, например,

а) для изоляции класса A $\theta + \vartheta_{о.ср} \leqslant 105$°C;

б) для класса B $\theta + \vartheta_{о.ср} \leqslant 130$°C;

в) для класса H $\theta + \vartheta_{о.ср} \leqslant 180$°C.

21. Сводные данные расчета трансформатора

Масса стали сердечника, *кг*	G_c
Удельный расход стали, *кг/ква*	G_c/P
Масса материала обмоток, *кг*	$G_к$

Удельный расход материала, *кг/ква* . . . . $G_к/P$
Отношение массы стали к массе материала обмоток . . . $G_с/G_к$
Магнитные потери в сердечнике . . . . $P_с$
Потери в обмотках . . . . $P_к$
Отношение потерь в обмотках к магнитным потерям . . . $P_к/P_с$
К. п. д. при номинальной нагрузке . . . . η
Превышение температуры нагрева трансформатора над температурой окружающей среды . . . . $\theta°$ С
Намагничивающий ток . . . . I_μ
Относительное изменение напряжения при номинальной нагрузке . . . . $\Delta U\%$

Анализируя полученные сводные данные, определяют необходимые изменения в расчете для полного удовлетворения всем техническим и экономическим требованиям. При выборе характера изменения исходных величин $S'_с$, $B_с$ и j можно воспользоваться следующими приближенными соотношениями между основными параметрами трансформатора:

$$S''_с = \xi S'_с; \qquad B'_с = \zeta B_с; \qquad j' = \psi j;$$
$$G'_с \approx \xi G_с; \qquad G'_с \approx G_с; \qquad G'_с \approx G_с;$$
$$P'_с \approx \xi P_с; \qquad P'_с \approx \zeta^2 P_с; \qquad P'_с \approx P_с;$$
$$G'_к \approx \frac{G_к}{\xi}; \qquad G'_к \approx \frac{G_к}{\zeta}; \qquad G'_к \approx \frac{G_к}{\psi};$$
$$P'_к \approx \frac{P_к}{\xi}; \qquad P'_к \approx \frac{P_к}{\zeta}; \qquad P'_к \approx \psi P_к.$$
$$\frac{G'_с}{G'_к} \approx \frac{G_с}{G_к}\xi^2; \qquad \frac{G'_с}{G'_к} \approx \frac{G_с}{G_к}\zeta; \qquad \frac{G'_с}{G'_к} \approx \frac{G_с}{G_к}\psi;$$
$$\frac{P'_к}{P'_с} \approx \frac{P_к}{P_с}\cdot\frac{1}{\xi^2}; \qquad \frac{P'_к}{P'_с} \approx \frac{P_к}{P_с}\cdot\frac{1}{\zeta^3}; \qquad \frac{P'_к}{P'_с} \approx \frac{P_к}{P_с}\psi;$$
$$I'_\mu \approx \xi I_\mu; \qquad I'_\mu \approx \zeta^2 I_\mu; \qquad I'_\mu \approx I_\mu;$$
$$\theta°' \approx \frac{\theta°}{\xi}; \qquad \theta°' \approx \frac{\theta°'}{\zeta}; \qquad \theta°' \approx \psi\theta°;$$
$$\Delta U'\% \approx \frac{\Delta U\%}{\xi}; \quad \Delta U'\% \approx \frac{\Delta U\%}{\zeta}; \quad \Delta U'\% \approx \psi\Delta U\%;$$
$$\eta = \frac{P}{P + \xi P_с + \frac{P_к}{\xi}}; \qquad \eta = \frac{P}{P + \zeta^2 P_с \frac{P_к}{\zeta}}; \quad \eta = \frac{P}{P + P_с + \psi P_к}.$$

Пользуясь приближенными соотношениями, можно найти нужное изменение исходных значений $S'_с$, $B_с$ и j для окончательного варианта расчета трансформатора.

Следует заметить, что в целях экономии времени в первом варианте расчета могут не вычисляться следующие величины: r, $e_а$, e_s, x, z и $\Delta U\%$.

III. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОДНОФАЗНОГО ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Задание

Число фаз $m = 1$.

Номинальные мощности вторичных обмоток:

$$P_2 = 75 \ ва, \quad P_3 = 25 \ ва.$$

Номинальные напряжения:

$$U_1 = 127 \ в, \ U_2 = 400 \ в \ \text{и} \ U_3 = 6 \ в.$$

Частота сети $f_1 = 50 \ гц$.

Коэффициенты мощности нагрузок:

$$\cos\varphi_2 = 1; \quad \cos\varphi_3 = 1.$$

Особые условия: трансформатор минимальной стоимости для продолжительной работы при окружающей температуре 50° С, исполнение — открытое, охлаждение — воздушное.

Выбор типа и основных соотношений трансформатора

В соответствии с условиями задания наиболее подходящим по конструкции является броневой тип трансформатора с сердечником из штампованных Ш-образных пластин и медными обмотками. Отношение массы стали к массе меди примем $\alpha = \frac{G_c}{G_к} = 5{,}5$. В качестве материала сердечника можно принять электротехническую сталь марки Э41 с толщиной листа $\delta_c = 0{,}5$ (ГОСТ 802—58).

1. Определение токов трансформатора

Ток первичной обмотки

$$I_1 = \frac{P}{U_1 \eta \cos\varphi_1} = \frac{100}{127 \cdot 0{,}86 \cdot 0{,}89} = 1{,}03 \ a,$$

где суммарная активная мощность вторичных обмоток

$$P = P_2 \cos\varphi_2 + P_3 \cos\varphi_3 = 75 \cdot 1 + 25 \cdot 1 = 100 \ вт;$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_\mu}{I_{1a}}\right)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0{,}50^2}} = 0{,}89.$$

Принимаем
$I_{1р} \approx I_{\mu}\% \approx 50\%$ от $I_{1а}$, или $I_{\mu} = 0{,}50 I_{1а}$ при $\cos\varphi_2 = 1$ и $\cos\varphi_3 = 1$.
По кривой $\eta = f(P)$ (см. рис. 17) для $P = 100$ *ва* находим $\eta \approx 0{,}86$.
Токи вторичных обмоток

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{75}{400} = 0{,}188 \text{ } a; \quad I_3 = \frac{P_3}{U_3} = \frac{25}{6} = 4{,}14 \text{ } a.$$

2. Предварительное значение индукции в стержне

$B_c = 1{,}3$ *тл.*

3. Предварительное значение плотности тока в медных проводах обмотки

$$j = 3{,}8 \text{ } a/мм^2.$$

4. Поперечное сечение стержня сердечника и ярма

$$S'_c = C\sqrt{\frac{P_1 a \cdot 10^2}{f_1 B_c j}} = 0{,}7\sqrt{\frac{130 \cdot 5{,}5 \cdot 10^2}{50 \cdot 1{,}3 \cdot 3{,}8}} \approx 12{,}4 \text{ } см^2;$$

$$S'_я = \frac{S'_c}{2} = \frac{12{,}4}{2} = 6{,}2 \text{ } см^2,$$

где $P_1 = U_1 I_1 = 127 \cdot 1{,}03 = 130$ *ва.*

Соответственно полные поперечные сечения будут:

$$S_c = \frac{S'_c}{k_з} = \frac{12{,}4}{0{,}92} = 13{,}6 \text{ } см^2;$$

$$S_я = \frac{S'_я}{k_з} = \frac{6{,}2}{0{,}92} = 6{,}8 \text{ } см^2.$$

Принимаем
$a = 3$ *см*; $b = \frac{S_c}{a} = \frac{13{,}6}{3} = 4{,}5$ *см*; $h_я = \frac{S_я}{b} = \frac{6{,}8}{4{,}5} = 1{,}5$ *см.*

5. Число витков обмоток трансформатора

Предварительное число витков первичной обмотки трансформатора

$$W'_1 = \frac{\left(U_1 - \frac{\Delta U\% \cdot U_1}{200}\right) 10^4}{4{,}44 \cdot f_1 B'_c S'_c} = \frac{\left(127 - \frac{10 \cdot 127}{200}\right) 10^4}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 1{,}3 \cdot 12{,}4} = 330,$$

где величина $\Delta U\%=10\%$ найдена по кривой $\Delta U\%=$ $=f(P)$ рис. 17 для $P=100$ *ва*.

Предварительная величина падения напряжения в обмотках трансформатора при нагрузке

$$e'_w=\frac{U_1-\frac{\Delta U\%\cdot U_1}{200}}{W'_1}=\frac{127-\frac{10\cdot 127}{200}}{330}=0{,}365\ \textit{в/виток}.$$

Предварительные числа витков вторичных обмоток трансформатора:

$$W'_2=\frac{U_2+\frac{\Delta U\%\cdot U_2}{200}}{e'_w}=\frac{400+\frac{10\cdot 400}{200}}{0{,}365}=1150;$$

$$W'_3=\frac{U_3+\frac{\Delta U\%\cdot U_3}{200}}{e'_w}=\frac{6+\frac{10\cdot 6}{200}}{0{,}365}=17.$$

Число витков обмотки низшего напряжения — целое; окончательно принимаем $B_c=1{,}3$ *тл*; $W_1=W'_1=330$; $W_2=W'_2=1150$; $W_3=W'_3=17$; $e_w=e'_w=0{,}365$ *в/виток*.

6. Сечения и диаметры проводов обмоток

Предварительные значения поперечных сечений проводов обмоток:

$$q'_1=\frac{I_1}{j'_1}=\frac{1{,}03}{3{,}8}=0{,}271\ \textit{мм}^2;\quad q'_2=\frac{I_2}{j'_2}=\frac{0{,}188}{3{,}8}=0{,}0495\ \textit{мм}^2;$$

$$q'_3=\frac{I_3}{j'_3}=\frac{4{,}14}{3{,}8}=1{,}09\ \textit{мм}^2.$$

Ближайшие сечения и диаметры проводов по ГОСТу 2773—51 из Приложения I равны:

$q_1=0{,}273$ *мм*^{2}; $d_1/d_{1и}=0{,}59/0{,}64$ *мм*;
$q_2=0{,}0572$ *мм*^{2}; $d_2/d_{2и}=0{,}27/0{,}305$ *мм*;
$q_3=1{,}13$ *мм*^{2}; $d_3/d_{3и}=1{,}20/1{,}28$ *мм*.

Окончательные значения плотностей тока в выбранных проводах:

$$j_1=\frac{I_1}{q_1}=\frac{1{,}03}{0{,}273}=3{,}77\ \textit{а/мм}^2;\quad j_2=\frac{I_2}{q_2}=\frac{0{,}188}{0{,}0572}=3{,}3\ \textit{а/мм}^2;$$

$$j_3=\frac{I_3}{q_3}=\frac{4{,}14}{1{,}13}=3{,}68\ \textit{а/мм}^2.$$

7. Выбор изоляции проводов обмоток

По ГОСТу 2773—51 (Приложение I) выбраны провода марки ПЭЛ.

8. Высота окна сердечника трансформатора

$$H \approx \sqrt{k \cdot \frac{q_1 W_1 + q_2 W_2 + q_3 W_3}{100 \cdot k_{ок}}} =$$

$$= \sqrt{2{,}8 \cdot \frac{0{,}273 \cdot 330 + 0{,}0572 \cdot 1150 + 1{,}13 \cdot 17}{100 \cdot 0{,}24}} = 4{,}5 \text{ см.}$$

9. Ширина окна сердечника трансформатора

Число витков первичной обмотки в слое (рис. 21)

$$n_1 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{1и}} = \frac{45 - 2 \cdot 3}{0{,}64} = 61;$$

число слоев этой обмотки

$$m_1 = \frac{W_1}{n_1} = \frac{330}{61} = 5{,}5 \approx 6;$$

толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = m_1 d_{1и} = 6 \cdot 0{,}64 = 3{,}8 \text{ мм.}$$

Число витков второй обмотки в слое

$$n_2 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{2и}} = \frac{45 - 2 \cdot 3}{0{,}305} = 125;$$

число слоев этой обмотки

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2} = \frac{1150}{125} = 9{,}3 \approx 10;$$

толщина второй обмотки

$$\delta_2 = m_2 (d_{2и} + \gamma_2) = 10\,(0{,}305 + 0{,}05) = 3{,}5 \text{ мм.}$$

Число витков третьей обмотки в слое

$$n_3 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{3и}} = \frac{45 - 2 \cdot 3}{1{,}28} = 30;$$

число слоев этой обмотки

$$m_3 = \frac{W_3}{n_3} = \frac{17}{30} \approx 1,$$

толщина третьей обмотки

$$\delta_3 = m_3 d_{3и} = 1 \cdot 1{,}28 = 1{,}3 \text{ мм}.$$

Ширина окна сердечника

$$c = k_2(\varepsilon_0 + \delta_2 + \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{13} + \delta_3) + \varepsilon_3 =$$
$$= 1{,}2 \times (1 + 3{,}5 + 0{,}5 + 3{,}8 + 0{,}5 + 1{,}3) + 3 = 15 \text{ мм},$$

где принято $\varepsilon_3 = 3$ *мм*, $\varepsilon_0 = 1$ *мм*; $\delta_{12} = \delta_{13} = 0{,}5$ *мм*; $k_2 = 1{,}2$. Изоляция между обмотками выполнена электрокартоном ЭВ (ГОСТ 2824—60).

Отношение

$$\frac{H}{c} = \frac{4{,}5}{1{,}5} = 3.$$

Сердечник может быть собран из Ш-образных пластин безотходной штамповки согласно Приложению II:

$$H = 4{,}5 \text{ см};\ c = 1{,}5 \text{ см};\ a = 3 \text{ см};$$
$$b = 4{,}5 \text{ см};\ h_я = 1{,}5 \text{ см}.$$

10. Масса медных обмоток трансформатора

Массы медных обмоток трансформатора в случае прямоугольных катушек определяются следующим образом:

$$l_{w1} = 2[a + b + 4(\varepsilon_0 + \delta_2 + \delta_{12}) + 2\delta_1] =$$
$$= 2 \times [3 + 4{,}5 + 4(0{,}1 + 0{,}35 + 0{,}05) + 2 \cdot 0{,}38] \approx 20{,}3 \text{ см};$$
$$G_{к1} = 8{,}9 \cdot W_1 q_1 \cdot l_{w1} \cdot 10^{-5} =$$
$$= 8{,}9 \cdot 330 \cdot 0{,}273 \cdot 20{,}3 \cdot 10^{-5} = 0{,}163 \text{ кг};$$
$$l_{w2} = 2(a + b + 4\varepsilon_0 + 2\delta_2) =$$
$$= 2(3 + 4{,}5 + 4 \cdot 0{,}1 + 2 \cdot 0{,}35) \approx 17{,}2 \text{ см};$$
$$G_{к2} = 8{,}9 \cdot W_2 \cdot q_2 \cdot l_{w2} \cdot 10^{-5} =$$
$$= 8{,}9 \cdot 1150 \cdot 0{,}0572 \cdot 17{,}2 \cdot 10^{-5} = 0{,}100 \text{ кг};$$
$$l_{w3} = 2[a + b + 4(\varepsilon_0 + \delta_2 + \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_{13}) + 2\delta_3] =$$
$$= 2[3 + 4{,}5 + 4(0{,}1 + 0{,}35 + 0{,}05 + 0{,}38 + 0{,}05) +$$
$$+ 2 \cdot 0{,}13] = 22{,}7 \text{ см};$$
$$G_{к3} = 8{,}9 \cdot W_3 \cdot q_3' l_{w3} \cdot 10^{-5} =$$
$$= 8{,}9 \cdot 17 \cdot 1{,}13 \cdot 22 \cdot 7 \cdot 10^{-5} = 0{,}039 \text{ кг}.$$

Общая масса медных обмоток

$$G_к = G_{к1} + G_{к2} + G_{к3} = 0{,}163 + 0{,}100 + 0{,}039 = 0{,}302 \text{ кг}.$$

11. Потери в обмотках трансформатора при 75° С

$$P_{к1}=2{,}4j_1^2G_{к1}=2{,}4\cdot 3{,}77^2\cdot 0{,}163=5{,}50\ вт;$$
$$P_{к2}=2{,}4j_2^2G_{к2}=2{,}4\cdot 3{,}3^2\cdot 0{,}100=2{,}62\ вт;$$
$$P_{к3}=2{,}4j_3^2G_{к3}=2{,}4\cdot 3{,}68^2\cdot 0{,}039=1{,}27\ вт.$$

Суммарные потери в обмотках

$$P_к=P_{к1}+P_{к2}+P_{к3}=5{,}50+2{,}62+1{,}27\approx 9{,}4\ вт.$$

12. Масса стали сердечника трансформатора

$$G_{с.\,с}=7{,}6HS'_с\cdot 10^{-3}=7{,}6\cdot 4{,}5\cdot 12{,}4\cdot 10^{-3}=0{,}44\ кг;$$
$$l_я=2c+a+2h_я=2\cdot 1{,}5+3+2\cdot 1{,}5=9\ см;$$
$$G_{с.\,я}=2\cdot 7{,}6\,(H+l_я)\,S'_я\cdot 10^{-3}=$$
$$=2\cdot 7{,}6\,(4{,}5+9)\,6{,}2\cdot 10^{-3}=1{,}32\ кг.$$

Общая масса сердечника

$$G_с=G_{с.\,с}+G_{с.\,я}=0{,}44+1{,}32=1{,}76\ кг.$$

13. Магнитные потери в сердечнике трансформатора

$$P_{с.\,с}=k_сB_с^2G_{с.\,с}=1{,}6\cdot 1{,}3^2\cdot 0{,}44=1{,}2\ вт;$$
$$P_{с.\,я}=k_сB_я^2G_{с.\,я}=1{,}6\cdot 1{,}3^2\cdot 1{,}32=3{,}67\ вт.$$

Полные магнитные потери в сердечнике

$$P_с=P_{с.\,с}+P_{с.\,я}=1{,}2+3{,}67=4{,}87\ вт.$$

14. Ток холостого хода трансформатора

$$I_0\approx I_\mu=\frac{aw_сl'_с+aw_яl'_я+0{,}8B_сn\delta_э\cdot 10^4}{\sqrt{2}\cdot W_1}=$$
$$=\frac{7{,}4\cdot 4{,}5+7{,}4\cdot 13{,}5+0{,}8\cdot 1{,}3\cdot 2\cdot 0{,}004\cdot 10^4}{\sqrt{2}\cdot 330}=0{,}465\ a,$$

где $l'_с=H=4{,}5\ см$; $l'_я=H+l_я=4{,}5+9=13{,}5\ см$; $aw_с=aw_я=7{,}4$ — по кривой рис. 42 для стали марки Э41 при $B_с=B_я=1{,}3\ тл$; $i_\mu\%=\frac{I_\mu}{I_{1а}}100=\frac{0{,}465}{0{,}92}\times$ $\times 100=50\%$; $I_{1а}=I_1\cos\varphi_1=1{,}03\cdot 0{,}89=0{,}92\ а$.

15. Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P}{P + P_c + P_к} 100 = \frac{100}{100 + 4{,}87 + 9{,}4} \cdot 100 \approx 88\%.$$

16. Активные падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора

Относительные активные падения напряжения в обмотках

$$e_{a1}\% = \frac{P_{к1}}{U_1 I_1} 100 = \frac{5{,}50}{127 \cdot 1{,}03} 100 = 4{,}20\%;$$

$$e_{a2}\% = \frac{P_{к2}}{U_2 I_2} 100 = \frac{2{,}62}{400 \cdot 0{,}188} 100 = 3{,}50\%;$$

$$e_{a3}\% = \frac{P_{к3}}{U_3 I_3} 100 = \frac{1{,}27}{6 \cdot 4{,}14} 100 = 5{,}07\%.$$

Активные сопротивления обмоток

$$r_1 = \frac{P_{к1}}{I_1^2} = \frac{5{,}50}{1{,}03^2} = 5{,}2 \text{ ом};$$

$$r_2 = \frac{P_{к2}}{I_2^2} = \frac{2{,}62}{0{,}188^2} = 74{,}3 \text{ ом};$$

$$r_3 = \frac{P_{к3}}{I_3^2} = \frac{1{,}27}{4{,}14^2} = 0{,}075 \text{ ом}.$$

Активные сопротивления короткого замыкания обмоток

$$r_{к12} = r_1 + r_2' = r_1 + r_2\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 = 5{,}2 + 74{,}3\left(\frac{330}{1150}\right)^2 = 11{,}3 \text{ ом};$$

$$r_{к13} = r_1 + r_3' = r_1 + r_3\left(\frac{W_1}{W_3}\right)^2 =$$

$$= 5{,}2 + 0{,}075\left(\frac{330}{17}\right)^2 = 8{,}0 \text{ ом}.$$

17. Индуктивные падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора

Относительные индуктивные падения напряжения соответствующих пар обмоток при расположении

первичной обмотки между двумя вторичными (рис. 21):

$$\delta_{s12}=\delta_{12}+\frac{\delta_1+\delta_2}{3}=0{,}05+\frac{0{,}38+0{,}35}{3}=0{,}293\ \text{см};$$

$$e_{s12}\%=\frac{4f_1\delta_{s12}\left(I_1W_1l_{w1}+I_2W_2l_{w2}\frac{P_1}{P_2}\right)\cdot 10^{-6}}{e_w l_s}=$$

$$=\frac{4\cdot 50\cdot 0{,}293\left(1{,}03\cdot 330\cdot 20{,}3+0{,}188\cdot 1150\cdot 17{,}2\cdot\frac{130}{75}\right)\cdot 10^{-6}}{0{,}365\cdot 4{,}5}=$$

$$=0{,}48\%;$$

$$\delta_{s13}=\delta_{13}+\frac{\delta_1+\delta_3}{3}=0{,}05+\frac{0{,}38+0{,}13}{3}=0{,}22\ \text{см};$$

$$e_{s13}\%=\frac{4f_1\delta_{s13}\left(I_1W_1l_{w1}+I_3W_3l_{w3}\frac{P_1}{P_3}\right)\cdot 10^{-6}}{e_w l_s}=$$

$$=\frac{4\cdot 50\cdot 0{,}22\cdot\left(1{,}03\cdot 330\cdot 20{,}3+4{,}14\cdot 17\cdot 22{,}7\cdot\frac{130}{25}\right)\cdot 10^{-6}}{0{,}365\cdot 4{,}5}=$$

$$=0{,}43\%;$$

$$\delta_{s23}=\delta_{12}+\delta_1+\delta_{13}+\frac{\delta_2+\delta_3}{3}=$$

$$=0{,}05+0{,}38+0{,}05+\frac{0{,}35+0{,}13}{3}=0{,}64\ \text{см};$$

$$e_{s23}=\frac{4f_1\delta_{s23}\left(I_2W_2l_{w2}\frac{P_1}{P_2}+I_3W_3l_{w3}\frac{P_1}{P_3}\right)\cdot 10^{-6}}{e_w l_s}=$$

$$=\frac{4\cdot 50\cdot 0{,}64\left(0{,}188\cdot 1150\cdot 17{,}2\cdot\frac{130}{75}+4{,}14\cdot 17\cdot 22{,}7\frac{130}{25}\right)\cdot 10^{-6}}{0{,}365\cdot 4{,}5}=$$

$$=1{,}19\%.$$

Здесь

$$P_1=U_1I_1=127\cdot 1{,}03=130\ \text{ва};\quad l_s\approx H=4{,}5\ \text{см}.$$

Индуктивные падения напряжения отдельных обмоток

а) пара обмоток 1 и 2

$$e_{s1}\%=\frac{4f_1\delta_{s12}I_1W_1l_{w1}\cdot 10^{-6}}{e_w l_s}=$$

$$=\frac{4\cdot 50\cdot 0{,}293\cdot 1{,}03\cdot 330\cdot 20{,}3\cdot 10^{-6}}{0{,}365\cdot 4{,}5}=0{,}25\%;$$

$$e_{s2}\%=e_{s12}\%-e_{s1}\%=0{,}48-0{,}25=0{,}23\%;$$

б) пара обмоток 1 и 3

$$e'_{s1}\% = \frac{4f_1\delta_{s13}I_1 W_1 l_{w1}\cdot 10^{-6}}{e_w l_s} =$$
$$= \frac{4\cdot 50\cdot 0{,}22\cdot 1{,}03\cdot 330\cdot 20{,}3\cdot 10^{-6}}{0{,}365\cdot 4{,}5} = 0{,}19\%;$$
$$e_{s3}\% = e_{s13}\% - e'_{s1}\% = 0{,}43 - 0{,}19 = 0{,}24\%.$$

Индуктивные сопротивления короткого замыкания пар обмоток

$$x_{к12} = x_1 + x'_2 = \frac{e_{s12}\%\cdot U_1}{100\cdot I_1} = \frac{0{,}48\cdot 127}{100\cdot 1{,}03} \approx 0{,}59\ \textit{ом};$$
$$x_{к13} = x'_1 + x'_3 = \frac{e_{s13}\%\cdot U_1}{100 I_1} = \frac{0{,}43\cdot 127}{100\cdot 1{,}03} \approx 0{,}53\ \textit{ом}.$$

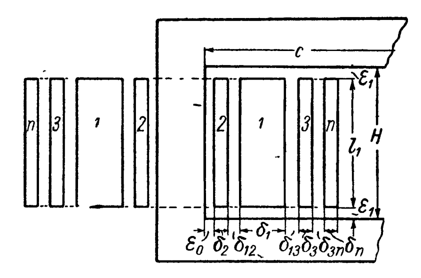


Рис. 21. Расположение обмоток на сердечнике трансформатора.

Полные сопротивления короткого замыкания пар обмоток

$$z_{к12} = \sqrt{r^2_{к12} + x^2_{к12}} = \sqrt{11{,}3^2 + 0{,}59^2} \approx 11{,}3\ \textit{ом};$$
$$z_{к13} = \sqrt{r^2_{к13} + x^2_{к13}} = \sqrt{8{,}0^2 + 0{,}53^2} \approx 8{,}0\ \textit{ом}.$$

Напряжения короткого замыкания пар обмоток

$$e_{к12}\% = \frac{z_{к12}\cdot I_1}{U_1} 100 = \frac{11{,}3\cdot 1{,}03}{127} 100 = 9{,}15\%;$$
$$e_{к13}\% = \frac{z_{к13}\cdot I_1}{U_1} 100 = \frac{8{,}0\cdot 1{,}03}{127} 100 = 6{,}5\%.$$

18. Изменения напряжения трансформатора при нагрузке

$$\Delta U_{12}\% \approx e_{a1}\cos\varphi_1 + e_{a2}\cos\varphi_2 + e_{s1}\sin\varphi_1 + e_{s2}\sin\varphi_2 =$$
$$= 4{,}20\cdot 0{,}89 + 3{,}5\cdot 1 + 0{,}25\cdot 0{,}16 + 0 \approx 7{,}20\%;$$
$$\Delta U_{13}\% \approx e_{a1}\cos\varphi_1 + e_{a3}\cos\varphi_3 + e'_{s1}\sin\varphi_1 + e_{s3}\sin\varphi_3 =$$
$$= 4{,}20\cdot 0{,}89 + 5{,}07\cdot 1 + 0{,}19\cdot 0{,}16 + 0 \approx 8{,}84\%.$$

Влияние индуктивного падения напряжения на величину изменения напряжения весьма незначительно.

Напряжение на зажимах вторичных обмоток при нагрузке

$$U_2 = U_1 \frac{W_2}{W_1}\left(1 - \frac{\Delta U_{12}\%}{100}\right) = 127 \cdot \frac{1150}{330}\left(1 - \frac{7{,}2}{100}\right) = 408 \text{ в};$$

$$U_3 = U_1 \frac{W_3}{W_1}\left(1 - \frac{\Delta U_{13}\%}{100}\right) = 127 \cdot \frac{17}{330}\left(1 - \frac{8{,}84}{100}\right) = 6 \text{ в}.$$

Для получения номинального напряжения при нагрузке на зажимах второй обмотки число витков ее следует уменьшить.

Окончательное значение числа витков

$$W_2 = 1150 - \frac{408 - 400}{0{,}365} = 1150 - 22 = 1128.$$

19. Проверка трансформатора на нагревание

$$\theta \approx \frac{P_к + P_с}{13 \cdot 10^{-4}(S_{обм} + S_{сер})} + \Delta\theta^\circ =$$
$$= \frac{9{,}4 + 4{,}87}{13 \cdot 10^{-4}(104 + 270)} + 12^\circ \approx 42^\circ \text{C},$$

где

$$S_{обм} = 2[a + b + 4(\varepsilon_0 + \delta_2 + \delta_{12} + \delta_1 + \delta_{13} + \delta_3)] \cdot H =$$
$$= 2[3 + 4{,}5 + 4(0{,}1 + 0{,}35 + 0{,}05 + 0{,}38 + 0{,}05 +$$
$$+ 0{,}13)] \cdot 4{,}5 = 104 \text{ см}^2;$$

$$S_{сер} = 2(b + 2h_я)\, l_я + 4(b + h_я)\, H + 4bh_я =$$
$$= 2(4{,}5 + 2 \cdot 1{,}5)\, 9 + 4(4{,}5 + 1{,}5)\, 4{,}5 +$$
$$+ 4 \cdot 4{,}5 \cdot 1{,}5 = 270 \text{ см}^2.$$

Температура нагрева трансформатора будет:

$$\theta_т = \theta + \vartheta_{о.ср} = 42 + 50 = 92^\circ \text{C}.$$

20. Сводные данные

Масса стали сердечника	1,76 *кг*
Удельный расход стали	17,6 *кг/ква*
Масса меди обмоток	0,302 *кг*
Удельный расход меди	3,02 *кг/ква*
Отношение массы стали к массе меди	5,8
Магнитные потери в сердечнике	4,87 *вт*
Потери в меди обмоток	9,4 *вт*

Отношение потерь в меди к потерям в стали . .	2,07
К. п. д.	88%
Превышение температуры	42° C
Намагничивающий ток	50%
Относительные изменения напряжения	$\Delta U_{12}\% = 7{,}20\%$
	$\Delta U_{13}\% = 8{,}84\%$

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

СИЛОВЫЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Автотрансформатор отличается от трансформатора тем, что он имеет одну обмотку, часть которой одновременно принадлежит первичной и вторичной цепям

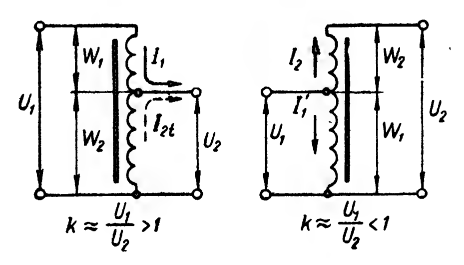


Рис. 22. Схемы автотрансформатора.

(рис. 22). Вследствие этого передача мощности в автотрансформаторе из первичной цепи во вторичную происходит электрическим и магнитным путями. В конструктивном отношении различия между автотрансформатором и трансформатором практически не существует.

Если пренебречь потерями энергии и намагничивающим током, то полная мощность вторичной цепи автотрансформатора практически будет

$$P_2 = U_2 I_2 \approx U_1 I_1.$$

В случае понижающего автотрансформатора

$$k = \frac{W_1 + W_2}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} > 1$$

и полная мощность вторичной цепи

$$P_2 = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{2t}) = U_2 I_1 + U_2 I_{2t} =$$
$$= U_2 I_2 \frac{1}{k} + U_2 I_2 \cdot \frac{k-1}{k} = P_э + P_{2t};$$

в случае повышающего автотрансформатора

$$k' = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} < 1$$

и полная мощность вторичной цепи

$$P_2 = U_2 I_2 = U_1 I_1 = U_1 (I_2 + I_1') = U_1 I_2 + U_1 I_1' =$$
$$= U_2 I_2 k' + U_2 I_2 (1 - k') = P_э + P_{2t}.$$

В понижающем автотрансформаторе магнитным путем из первичной цепи во вторичную поступает мощность $P_{2t} = U_2 I_2 \cdot \frac{k-1}{k}$, а электрическим путем мощность $P_э = U_2 I_2 \cdot \frac{1}{k}$; в повышающем автотрансформаторе — соответственно мощности

$$P_{2t} = U_2 I_2 (1 - k') \quad \text{и} \quad P_э = U_2 I_2 k'.$$

Основные размеры автотрансформатора и его потери энергии определяются мощностью P_{2t}, называемой расчетной, или электромагнитной мощностью.

Величина расчетной мощности P_{2t} при общей заданной мощности вторичной цепи $P_2 = U_2 I_2$ будет тем меньше, чем ближе коэффициент трансформации автотрансформатора к единице. С уменьшением расчетной мощности уменьшаются размеры и потери автотрансформатора.

Автотрансформатор выгодно применять в тех случаях, когда коэффициент трансформации близок к единице, так как при этом расчетная мощность его P_{2t} мала по сравнению с заданной мощностью P_2, а следовательно, размеры, масса, стоимость и потери его значительно меньше, чем у трансформатора той же мощности.

Автотрансформаторы часто выполняются с секционированной обмоткой, что позволяет использовать их для подбора и регулирования напряжения различных устройств.

Расчет автотрансформаторов малой мощности почти не отличается от изложенного выше расчета малых трансформаторов.

II. РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Исходными данными для расчета силовых автотрансформаторов малой мощности являются следующие величины: число фаз m; номинальная мощность вторичной цепи P_2[*ва*]; номинальные напряжения U_1 и U_2 [*в*]; частота сети f_1 [*гц*]; коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_2$.

В случае автотрансформатора с секционированной обмоткой должны быть заданы вторичные мощности, напряжения и коэффициенты мощности нагрузок отдельных секций — P_2, P_3, ..., P_n; U_a, U_c, ..., U_n и $\cos\varphi_2$, $\cos\varphi_3$, ..., $\cos\varphi_n$ (рис. 23).

1. Расчетная мощность автотрансформатора

Как указывалось выше, во вторичную цепь трансформатора мощность передается магнитным и электрическим путями. Основные размеры автотрансформатора определяются величиной мощности P_{2t}, передаваемой во вторичную цепь магнитным путем. Величина этой расчетной мощности будет следующей:

а) в случае понижающего автотрансформатора

$$P_{2t} \approx P_2\left(\frac{k-1}{k}\right); \quad k = \frac{W_1 + W_2}{W_2} > 1;$$

б) в случае повышающего автотрансформатора

$$P_{2t} \approx P_2(1 - k'); \quad k = \frac{W_1}{W_1 + W_2} < 1,$$

где $P_2 = U_2 I_2$ — заданная мощность вторичной цепи; W_1 и W_2 — числа витков отдельных частей обмоток (рис. 22).

В случае автотрансформатора с секционированной обмоткой величину P_{2t} следует вычислять для всех коэффициентов трансформации, причем полученные результаты целесообразно свести в табл. 4

Таблица 4

k	P	P_{2t}	Примечание
U_1/U_a	P_2		
U_1/U_c	P_3		
....			
U_1/U_n	P_n		

2. Определение токов автотрансформатора

Величины токов первичной и вторичной цепей для разных коэффициентов трансформации автотрансформатора могут быть определены по следующим формулам:

а) однофазный автотрансформатор (рис. 23)

1) для $k_a = \frac{U_1}{U_a}$

первичный ток, активная и реактивная составляющие первичного тока

$$I_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1}; \quad I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1; \quad I_{1p} = I_\mu + \frac{P_2 \sin \varphi_2}{U_1 \eta};$$

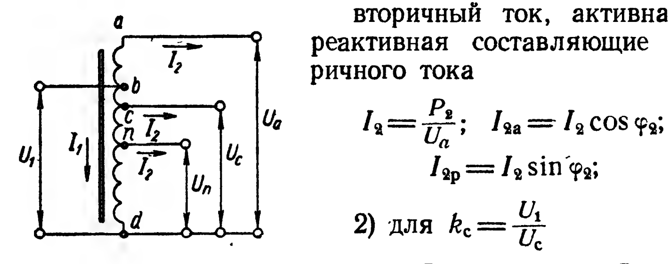


Рис. 23. Схема секционированного автотрансформатора.

вторичный ток, активная и реактивная составляющие вторичного тока

$$I_2 = \frac{P_2}{U_a}; \quad I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2;$$

$$I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2;$$

2) для $k_c = \frac{U_1}{U_c}$

$$I_1 = \frac{P_3 \cos \varphi_3}{U_1 \eta \cos \varphi_1}; \quad I_{1a} = \frac{P_3 \cos \varphi_3}{U_1 \eta};$$

$$I_{1p} = I_\mu + \frac{P_3 \sin \varphi_3}{U_1 \eta};$$

$$I_2 = \frac{P_3}{U_c}; \qquad I_{2a} = I_2 \cos \varphi_3; \quad I_{2p} = I_2 \sin \varphi_3;$$

. . . .

3) для $k_n = \frac{U_1}{U_n}$

$$I_1 = \frac{P_n \cos \varphi_n}{U_1 \eta \cos \varphi_1}; \quad I_{1a} = \frac{P_n \cos \varphi_n}{U_1 \eta}; \quad I_{1p} = I_\mu + \frac{P_n \sin \varphi_n}{U_1 \eta};$$

$$I_2 = \frac{P_n}{U_n}; \qquad I_{2a} = I_2 \cos \varphi_n; \quad I_{2p} = I_2 \sin \varphi_n;$$

б) трехфазный автотрансформатор

1) для $k_a = \frac{U_1}{U_a}$

$$I_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3}\, U_1 \eta \cos \varphi_1}; \quad I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1;$$

$$I_{1p} = \frac{I_{\mu 1} + 2 I_{\mu 2}}{3} + \frac{P_2 \sin \varphi_2}{\sqrt{3}\, U_1 \eta};$$

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3}\, U_a}; \quad I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2;$$

2) для $k_r = \frac{U_1}{U_c}$

$$I_1 = \frac{P_3 \cos\varphi_3}{\sqrt{3}\, U_1 \eta \cos\varphi_1}; \quad I_{1a} = I_1 \cos\varphi_1;$$

$$I_{1p} = \frac{I_{\mu 1} + 2I_{\mu 2}}{3} + \frac{P_3 \sin\varphi_3}{\sqrt{3}\, U_1 \eta};$$

$$I_2 = \frac{P_3}{\sqrt{3}\, U_c}; \quad I_{2a} = I_2 \cos\varphi_3; \quad I_{2p} = I_2 \sin\varphi_3;$$

. . . .

3) для $k_n = \frac{U_1}{U_n}$

$$I_1 = \frac{P_n \cos\varphi_n}{\sqrt{3}\, U_1 \eta \cos\varphi_1}; \quad I_{1a} = I_1 \cos\varphi_1;$$

$$I_{1p} = \frac{I_{\mu 1} + 2I_{\mu 2}}{3} + \frac{P_n \sin\varphi_n}{\sqrt{3}\, U_1 \eta};$$

$$I_2 = \frac{P_n}{\sqrt{3}\, U_n}; \quad I_{2a} = I_2 \cos\varphi_n; \quad I_{2p} = I_2 \sin\varphi_n,$$

где P_2, P_3, ..., P_n; U_a, U_c, ..., U_n; $\cos\varphi_2$, $\cos\varphi_3$, ..., $\cos\varphi_n$ — заданные мощности, напряжения и коэффициенты мощности вторичных цепей; I_μ — намагничивающий ток автотрансформатора, который предварительно может быть принят $I_\mu\% \approx (40 \div 50) \frac{P_{2t}}{P_2} \%$ — от величины активной составляющей первичного тока; $I_{\mu 1}$ и $I_{\mu 2}$ — намагничивающие токи в средней и крайних фазах трехфазного автотрансформатора; η — предварительное значение к. п. д. автотрансформатора, определенное по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \left(\frac{1 - \eta_{2t}}{\eta_{2t}}\right) P_{2t}};$$

η_{2t} — к. п. д. трансформатора мощностью, равной расчетной мощности автотрансформатора P_{2t}, может быть ориентировочно найден по кривой рис. 17; $\cos\varphi_1$ — коэффициент мощности первичной цепи, определяемый, как и в малых трансформаторах, по позиции 1 главы третьей.

Полученные значения токов для всех коэффициентов трансформации удобно свести в табл. 5.

Таблица 5

k	P	$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	I_2	I_{2a}	I_{2p}	I_1	I_{1a}	I_{1p}	$\cos\varphi_1$	η	Примечание
	Заданы			Вычисляются								
U_1/U_a U_1/U_c . . . U_1/U_n	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	.	. .

В том случае, когда U_2 отличается от U_1 не более чем на 25%, нагрузка вторичной цепи активная, а величина мощности P_{2f} не менее 50÷75 *ва*, можно при определении первичных токов трансформатора с достаточной точностью положить $\cos\varphi_1$ и η равными единице.

3. Определение токов отдельных частей обмотки автотрансформатора

Величина токов отдельных частей обмотки трансформатора может быть определена методом наложения вторичной цепи на первичную. В случае автотрансформатора с секционированной обмоткой определение токов отдельных частей обмотки следует производить при всех коэффициентах трансформации (рис. 23).

В соответствии с рис. 23 величина токов в отдельных частях обмотки трансформатора при включении нагрузки на одно из соответствующих вторичных напряжений может быть определена по формулам:

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a}$

$$I_{ab}=I_2; \quad I_{bd}=\dot{I}_1-\dot{I}_2=\sqrt{(I_{1a}-I_{2a})^2+(I_{1p}-I_{2p})^2};$$

б) при $k_c \approx \frac{U_1}{U_c}$

$$I_{ab}=0; \quad I_{bc}=I_1; \quad I_{cd}=\dot{I}_2-\dot{I}_1=$$
$$=\sqrt{(I_{2a}-I_{1a})^2+(I_{2p}-I_{1p})^2};$$

. . . .

в) при $k_n \approx \frac{U_1}{U_n}$

$$I_{ab}=0; \quad I_{bn}=I_1; \quad I_{dn}=\dot{I}_2-\dot{I}_1=$$
$$=\sqrt{(I_{2a}-I_{1a})^2+(I_{2p}-I_{1p})^2},$$

где I_1, I_{1a}, I_{1p}, I_2, I_{2a}, I_{2p} — полные, активные и реактивные составляющие токов первичных и вторичных цепей из табл. 5.

Вычисленные значения токов отдельных частей обмотки автотрансформатора удобно записать в табл. 6.

Таблица 6

k	$\frac{U_1}{U_a}$	$\frac{U_1}{U_c}$		$\frac{U_1}{U_n}$	Примечание
I_{ab}					
I_{bc}					
I_{cd}					
....					......
I_{dn}					

4. Выбор индукции в стержне сердечника автотрансформатора

Выбор величины индукции в стержне сердечника малого автотрансформатора производится так же, как и в малых трансформаторах, по позиции 2 главы третьей.

5. Выбор плотности тока в проводах обмотки автотрансформатора

Выбор плотности тока в обмотках автотрансформаторов определяется теми же условиями, как и у малого трансформатора, по позиции 3 главы третьей. При выборе плотности тока в обмотке трансформатора необходимо руководствоваться его расчетной мощностью P_{2t}.

В автотрансформаторах с расчетной мощностью P_{2t} примерно до 100 *ва* допускаемая плотность тока в проводах медной обмотки может составлять

$$j = 4{,}5 \div 3{,}5 \ a/мм^2.$$

В автотрансформаторах с расчетной мощностью P_{2t} свыше 100 *ва* и до нескольких сотен вольт-ампер эта плотность обычно составляет

$$j = 3{,}5 \div 2{,}5 \ a/мм^2.$$

При температуре окружающей среды до $+80 \div 150^\circ$ C следует выбирать низкие пределы плотности тока.

Плотность тока j_a в проводах алюминиевых обмоток малых автотрансформаторов при прочих равных условиях принимается примерно в $1,4 \div 1,6$ раза меньше указанных значений для медных обмоток.

6. Определение поперечного сечения стержня и ярма сердечника автотрансформатора

Определение поперечных сечений стержня S'_c и ярма $S'_я$ сердечника автотрансформатора производится так же, как и в малых трансформаторах, по позиции 4 главы третьей, с тем отличием, что в формулу для определения сечения стержня S'_c вместо P_1 ставится расчетная мощность автотрансформатора P_{2t} и коэффициент C в этой формуле должен быть увеличен на 15—20%.

7. Определение числа витков обмотки автотрансформатора

В силовых автотрансформаторах малой мощности величина падения напряжения в обмотке при нагрузке меньше, чем в аналогичных трансформаторах примерно в отношении $\frac{P_{2t}}{P_2}$, поэтому при определении чисел витков обмоток можно пренебречь падением напряжения в них и вычислять их по формулам:

а) для однофазного автотрансформатора (рис. 23)

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4{,}44 f_1 B_c S'_c}; \quad e_w = \frac{U_1}{W_1} \; [в/виток];$$

$$W_{ab} = \frac{U_{ab}}{e_w}; \quad W_{bc} = \frac{U_{bc}}{e_w}; \quad W_{cn} = \frac{U_{cn}}{e_w};$$

. . . .

$$W = \frac{U_{nd}}{e_w};$$

б) для трехфазного автотрансформатора

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 4{,}44 f_1 B_c S'_c}; \quad e_w = \frac{U_1}{\sqrt{3}\, W_1} \; [в/виток];$$

$$W_{ab} = \frac{U_{ab}}{e_w}; \quad W_{bc} = \frac{U_{bc}}{e_w}; \quad W_{cn} = \frac{U_{cn}}{e_w};$$

. . . .

$$W_{nd} = \frac{U_{nd}}{e_w}.$$

8. Определение сечения и диаметра проводов обмотки

Предварительные значения поперечных сечений проводов отдельных участков обмотки автотрансформатора (рис. 23) определяются по формулам:

$$q'_{ab}=\frac{I_{ab}}{j'_{ab}}\ [мм^2];\quad q'_{bc}=\frac{I_{bc}}{j'_{bc}}\ [мм^2];\quad q'_{cn}=\frac{I_{cn}}{j'_{cn}}\ [мм^2];$$

$$q'_{nd}=\frac{I_{nd}}{j'_{nd}}\ [мм^2],$$

где I_{ab}, I_{bc}, I_{cn}, I_{nd} берутся из табл. 6, а j'_{ab}, j'_{bc}, j'_{cn}, j'_{nd} — из позиции 5 главы четвертой.

Окончательные значения поперечных сечений и диаметров проводов вибираются по ближайшим данным ГОСТ из Приложения I:

$$q_{ab}=\ldots\ [мм^2];\quad d_{ab}/d_{abи}=\ldots\ [мм];\quad q_{bc}=\ldots\ [мм^2];$$
$$d_{bc}/d_{bcи}=\ldots\ [мм];\quad q_{cn}=\ldots\ [мм^2];\quad d_{cn}/d_{cnи}=\ldots\ [мм];$$
$$q_{nd}=\ldots[мм^2];\quad d_{nd}/d_{ndи}=\ldots\ [мм].$$

По выбранным окончательно сечениям проводов уточняются плотности тока в проводах обмотки для всех коэффициентов трансформации:

$$j_{ab}=\frac{I_{ab}}{q_{ab}}\ [а/мм^2];\quad j_{bc}=\frac{I_{bc}}{q_{bc}}\ [а/мм^2];\quad j_{cn}=\frac{I_{cn}}{q_{cn}}\ [а/мм^2];$$

$$j_{nd}=\frac{I_{nd}}{q_{nd}}\ [а/мм^2].$$

9. Выбор изоляции проводов обмотки

Выбор изоляции проводов обмотки автотрансформатора производится так же, как и в малых трансформаторах, по позиции 7 главы третьей.

10. Определение высоты и ширины окна сердечника, укладка обмотки на его стержнях и уточнение размеров окна сердечника автотрансформатора

Определение размеров окна сердечника автотрансформатора и укладка обмотки на его стержнях производится так же, как и в малых трансформаторах, по позициям 8 и 9 главы третьей.

11. Масса материала обмотки автотрансформатора

Масса медной обмотки автотрансформатора определяется для каждого участка ее раздельно по следующим формулам:

а) для однофазного автотрансформатора (рис. 23)

$$G_{\text{к}ab} = 8{,}9 \cdot W_{ab} \cdot q_{ab} \cdot l_{wab} \cdot 10^{-5}\ [\text{кг}];$$
$$G_{\text{к}bc} = 8{,}9 \cdot W_{bc} \cdot q_{bc} \cdot l_{wbc} \cdot 10^{-5}\ [\text{кг}];$$
$$G_{\text{к}cn} = 8{,}9 \cdot W_{cn} \cdot q_{cn} \cdot l_{wcn} \cdot 10^{-5}\ [\text{кг}];$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$G_{\text{к}nd} = 8{,}9 \cdot W_{nd} \cdot q_{nd} \cdot l_{wnd} \cdot 10^{-5}\ [\text{кг}];$$

б) для трехфазного автотрансформатора

$$G_{\text{к}ab} = 3 \cdot 8{,}9 \cdot W_{ab} \cdot q_{ab} \cdot l_{wab} \cdot 10^{-5}\ [\text{кг}];$$
$$G_{\text{к}bc} = 3 \cdot 8{,}9 \cdot W_{bc} \cdot q_{bc} \cdot l_{wbc} \cdot 10^{-5}\ [\text{кг}];$$
$$G_{\text{к}cn} = 3 \cdot 8{,}9 \cdot W_{cn} \cdot q_{cn} \cdot l_{wcn} \cdot 10^{-5}\ [\text{кг}];$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$G_{\text{к}nd} = 3 \cdot 8{,}9 \cdot W_{nd} \cdot q_{nd} \cdot l_{wnd} \cdot 10^{-5}\ [\text{кг}].$$

Общая масса медной обмотки

$$G_{\text{к}} = G_{\text{к}ab} + G_{\text{к}bc} + G_{\text{к}cn} + \ldots + G_{\text{к}nd}\ [\text{кг}],$$

где W_{ab}, W_{bc}, W_{cn}, ... берутся из позиции 7, q_{ab}, q_{bc}, q_{cn}, ... — из позиции 8, l_{wab}, l_{wbc}, l_{wcn}, ... вычисляются по формулам позиции 10 главы третьей.

В случае алюминиевой обмотки автотрансформатора нужно для определения массы ее заменить в приведенных формулах множитель 8,9 на 2,7.

12. Потери в обмотке автотрансформатора

Потери в обмотке автотрансформатора при нагрузке и 75° С определяются раздельно для каждого участка обмотки при разных коэффициентах трансформации, когда нагрузка включена на одно из соответствующих вторичных напряжений:

а) при $k_a = \frac{U_1}{U_a}$

для медной обмотки

$$P_{\text{к}ab} = 2{,}4 j_{ab}^2 \cdot G_{\text{к}ab}\ [\text{вт}];$$
$$P_{\text{к}bc} = 2{,}4 j_{bc}^2 \cdot G_{\text{к}bc}\ [\text{вт}];$$
$$P_{\text{к}cn} = 2{,}4 j_{cn}^2 \cdot G_{\text{к}cn}\ [\text{вт}];$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$P_{\text{к}nd} = 2{,}4 j_{nd}^2 \cdot G_{\text{к}nd}\ [\text{вт}];$$

для алюминиевой обмотки

$$P_{\text{к}ab} = 13{,}2 j_{ab}^2 \cdot G_{\text{к}ab} \ [вт];$$
$$P_{\text{к}bc} = 13{,}2 j_{bc}^2 \cdot G_{\text{к}bc} \ [вт];$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$P_{\text{к}nd} = 13{,}2 j_{nd}^2 \cdot G_{\text{к}nd} \ [вт],$$

суммарные потери в обмотке

$$P_{\text{к}} = P_{\text{к}ab} + P_{\text{к}bc} + P_{\text{к}cn} + \ldots + P_{\text{к}nd} \ [вт];$$

б) при $k_c = \frac{U_1}{U_c}$

для медной обмотки

$$P_{\text{к}bc} = 2{,}4 j_{bc}^2 \cdot G_{\text{к}bc} \ [вт];$$
$$P_{\text{к}cn} = 2{,}4 j_{cn}^2 \cdot G_{\text{к}cn} \ [вт];$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$P_{\text{к}nd} = 2{,}4 j_{nd}^2 \cdot G_{\text{к}nd} \ [вт];$$

для алюминиевой обмотки

$$P_{\text{к}bc} = 13{,}2 j_{bc}^2 \cdot G_{\text{к}bc} \ [вт];$$
$$P_{\text{к}cn} = 13{,}2 j_{cn}^2 \cdot G_{\text{к}cn} \ [вт];$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$P_{\text{к}nd} = 13{,}2 j_{nd}^2 \cdot G_{\text{к}nd} \ [вт],$$

суммарные потери в обмотке

$$P_{\text{к}} = P_{\text{к}bc} + P_{\text{к}cn} + \ldots + P_{\text{к}nd} \ [вт];$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

в) при $k_n = \frac{U_1}{U_n}$

для медной обмотки

$$P_{\text{к}bc} = 2{,}4 j_{bc}^2 \cdot G_{\text{к}bc} \ [вт];$$
$$P_{\text{к}cn} = 2{,}4 j_{cn}^2 \cdot G_{\text{к}cn} \ [вт];$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$P_{\text{к}nd} = 2{,}4 j_{nd}^2 \cdot G_{\text{к}nd} \ [вт];$$

для алюминиевой обмотки

$$P_{\text{к}bc} = 13{,}2 j_{bc}^2 \cdot G_{\text{к}bc} \ [вт];$$
$$P_{\text{к}cn} = 13{,}2 j_{cn}^2 \cdot G_{\text{к}cn} \ [вт];$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$P_{\text{к}nd} = 13{,}2 j_{nd}^2 \cdot G_{\text{к}nd} \ [вт],$$

суммарные потери в обмотке

$$P_к = P_{к\,bc} + P_{к\,cn} + \ldots + P_{к\,nd} \text{ [вт]}.$$

13. Масса материала и магнитные потери в сердечнике автотрансформатора

Определение массы материала и магнитных потерь в сердечнике автотрансформатора производится так же, как и для малого трансформатора, по позициям 12 и 13 главы третьей.

14. Определение тока холостого хода автотрансформатора

Определение тока холостого хода автотрансформатора производится так же, как и малого трансформатора, по позиции 14 главы третьей.

15. Коэффициент полезного действия автотрансформатора

Величина к.п.д. автотрансформатора зависит для каждой данной нагрузки от коэффициента трансформации, поэтому ее вычисляют для всех значений коэффициентов трансформации. Для удобства эти вычисления сводят в табл. 7.

Таблица 7

k	$P_{к\,ab}$	$P_{к\,bc}$	$P_{к\,cn}$	$P_{к\,nd}$	$P_к$	$P_с$	P	η	Примечание
U_1/U_a									
U_1/U_c									
.	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. . . . . .
U_1/U_n									

Величина к.п.д. определяется по формуле

$$\eta = \frac{P}{P + P_к + P_с} 100,$$

где P — заданная для данного значения коэффициента трансформации нагрузка, *вт*: $P = P_2 \cos\varphi_2$, $P_3 \cos\varphi_3, \ldots$; $P_к$ — суммарные потери в обмотке автотрансформатора при данном коэффициенте трансформации из позиции 12 главы четвертой; $P_с$ — магнитные потери в сердечнике автотрансформатора из позиции 13.

16. Изменение напряжения автотрансформатора при нагрузке

Величина относительного изменения напряжения в автотрансформаторе при нагрузке определяется активным и индуктивными сопротивлениями соответствующих участков обмотки автотрансформатора. Так как относительная величина индуктивной составляющей падения напряжения в малых автотрансформаторах значительно меньше, чем в аналогичных трансформаторах, то при определении относительного изменения напряжения в автотрансформаторе при нагрузке этой составляющей практически можно пренебречь. Поэтому для искомой величины падения напряжения в этом случае можно записать

$$\Delta U\% = e_a\% \cdot \cos\varphi_1,$$

где $e_a\% = \frac{P_к}{P_2} 100$ — относительное активное падение напряжения в обмотке автотрансформатора при данной нагрузке вторичной цепи; $P_к$ — суммарные потери в обмотке автотрансформатора из позиции 15; P_2 — заданная полезная нагрузка, *ва*; $\cos\varphi_1$ — коэффициент мощности первичной цепи из позиции 2 главы четвертой.

В секционированном автотрансформаторе относительное изменение напряжения при нагрузке следует определить для всех коэффициентов трансформации и результаты расчета свести в табл. 8.

Таблица 8

k	$P_к$	$e_a\%$	$\cos\varphi_1$	$\Delta U\%$	Примечание
U_1/U_a					
U_1/U_c					
......					......
U_1/U_n					

17. Проверка автотрансформатора на нагревание

Проверка автотрансформатора на нагревание производится так же, как и малого трансформатора по позиции 20 главы третьей.

III. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОДНОФАЗНОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ С СЕКЦИОНИРОВАННОЙ ОБМОТКОЙ

Задание

Число фаз $m = 1$.
Номинальная мощность вторичной цепи $P_2 = 150$ *ва*.
Номинальные напряжения: $U_1 = 127$ *в*, $U_a = 140$ *в* и $U_c = 115$ *в*.
Частота сети $f_1 = 50$ *гц*.
Коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_2 = 1{,}0$.

Особые условия: автотрансформатор минимальной массы с медной обмоткой для продолжительной работы, исполнение открытое, охлаждение воздушное. Электрическая схема автотрансформатора показана на рис. 24.

Выбор типа и основных соотношений автотрансформатора

В соответствии с условиями задания наиболее подходящим по конструкции является броневой тип автотрансформатора с сердечником из штампованных Ш-образных пластин. Отношение массы стали к массе меди примем $\alpha = \frac{G_с}{G_к} \approx 3{,}5$. В качестве материала сердечника можно принять горячекатаную электротехническую сталь марки Э41 с толщиной листа $\delta_с = 0{,}5$ *мм* (ГОСТ 802—58, Приложение V).

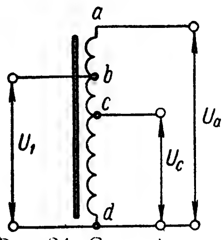


Рис. 24. Схема проектируемого автотрансформатора.

1. Расчетная мощность автотрансформатора

а) при коэффициенте трансформации $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = \frac{127}{140} = 0{,}907$

$$P_{2t} = P_2 \cdot (1 - k_a) = 150\,(1 - 0{,}907) \approx 13{,}6 \text{ ва};$$

б) при коэффициенте трансформации $k_c \approx \frac{U_1}{U_c} = \frac{127}{115} = 1,1$

$$P_{2t} = P_2 \cdot \frac{k_c - 1}{k_c} = 150 \cdot \frac{1,1 - 1}{1,1} \approx 14 \text{ ва}.$$

Таблица 1'

k	P_2	P_{2t}
$\frac{U_1}{U_a} = 0,907$	150	13,6
$\frac{U_1}{U_c} = 1,1$	150	14

2. Определение токов автотрансформатора

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = 0,907$

$$I_1 = \frac{P_2 \cos\varphi_2}{U_1 \eta \cos\varphi_1} = \frac{150 \cdot 1}{127 \cdot 0,96 \cdot 1} \approx 1,23 \ a; \quad I_{1a} \approx I_1 = 1,23 \ a;$$

$$I_{1p} \approx I_\mu = 0,05 \ a;$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U_a} = \frac{150}{140} = 1,07 \ a; \quad I_{2a} = I_2 = 1,07 \ a; \quad I_{2p} = 0,$$

где принято, что $I_\mu \% \approx (40 \div 50) \frac{P_{2t}}{P_2} = 40 \cdot \frac{14}{150} \approx 4\%$ от I_{1a};

$$I_\mu = \frac{I_\mu \% \cdot I_{1a}}{100} = \frac{4 \cdot 1,23}{100} = 0,05 \ a; \ \cos\varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_\mu}{I_{1a}}\right)^2}} \approx 1,0;$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \left(\frac{1 - \eta_{2t}}{\eta_{2t}}\right) P_{2t}} = \frac{150}{150 + \frac{1 - 0,7}{0,7} \cdot 14} \approx 0,96; \quad \eta_{2t} = 0,7$$

при $P_{2t} = 14$ *ва* по кривой $\eta = f(P)$ рис. 17;

б) при $k_c \approx \frac{U_1}{U_c} = 1,1$

$$I_1 = \frac{P_2 \cos\varphi_2}{U_1 \eta \cos\varphi_1} = \frac{150 \cdot 1}{127 \cdot 0,91 \cdot 1} = 1,23 \ a; \quad I_{1a} \approx I_1 = 1,23 \ a;$$

$$I_{1p} = 0,05 \ a; \quad I_2 = \frac{P_2}{U_c} = \frac{150}{115} = 1,3 \ a;$$

$$I_{2a} = I_2 = 1,3 \ a; \quad I_{2p} = 0.$$

Таблица 2'

k	P_2	$\cos\varphi_2$	$\sin\varphi_2$	I_2	I_{2a}	I_1	I_{1a}	I_{1p}	$\cos\varphi_1$	η
$\frac{U_1}{U_a}=0{,}907$	150	1	0	1,07	1,07	1,23	1,23	0,05	1	0,96
$\frac{U_1}{U_c}=1{,}1$	150	1	0	1,3	1,3	1,23	1,23	0,05	1	0,96

3. Токи отдельных частей обмотки автотрансформатора

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = 0{,}907$

$$I_{ab} = I_2 = 1{,}07\ a;\quad I_{bd} = \sqrt{(I_{1a} - I_{2a})^2 + (I_{1p} - I_{2p})^2} =$$
$$= \sqrt{(1{,}23 - 1{,}07)^2 + (0{,}05 - 0)^2} = 0{,}175\ a;$$

б) при $k_c' \approx \frac{U_1}{U_c} = 1{,}1$

$$I_{ab} = 0;\quad I_{bc} = I_1 = 1{,}23\ a;\quad I_{cd} =$$
$$= \sqrt{(I_{2a} - I_{1a})^2 + (I_{2p} - I_{1p})^2} =$$
$$= \sqrt{(1{,}3 - 1{,}23)^2 + (0 - 0{,}05)^2} = 0{,}101\ a.$$

Таблица 3'

k	I_{ab}	I_{bc}	I_{cd}
$\frac{U_1}{U_a}=0{,}907$	1,07	0,175	0,175
$\frac{U_1}{U_c}=1{,}1$	0	1,23	0,101

4. Предварительное значение индукции в стержне

$$B_c = 1{,}3\ тл.$$

5. Предварительное значение плотности тока в обмотке автотрансформатора

$$j = 4{,}0\ а/мм^2.$$

6. Поперечное сечение стержня сердечника автотрансформатора

$$S_c' = C\sqrt{\frac{P_2 t^{\alpha} \cdot 10^2}{f_1 B_c j}} = 0{,}8\sqrt{\frac{14 \cdot 3{,}5 \cdot 10^2}{50 \cdot 1{,}3 \cdot 4{,}0}} \approx 3{,}6\ см^2;$$

геометрическое сечение стержня

$$S_c = \frac{S'_c}{k_з} = \frac{3,6}{0,92} = 3,9 \text{ см}^2.$$

7. Число витков обмоток автотрансформатора

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4,44 f_1 B_c S'_c} = \frac{127 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 3,6} = 1225;$$

$$e_w = \frac{U_1}{W_1} = \frac{127}{1225} = 0,1038 \text{ в/виток};$$

$$W_{ab} = \frac{U_a - U_1}{e_w} = \frac{140 - 127}{0,1038} = 125;$$

$$W_{bc} = \frac{U_1 - U_c}{e_w} = \frac{127 - 115}{0,1038} = 115;$$

$$W_{cd} = \frac{U_c}{e_w} = \frac{115}{0,1038} = 1110.$$

8. Сечения и диаметры проводов обмотки

Предварительные значения поперечных сечений отдельных участков обмотки

$$q'_{ab} = \frac{I_{ab}}{j'_{ab}} = \frac{1,07}{4} = 0,268 \text{ мм}^2; \quad q'_{bc} = \frac{I_{bc}}{j'_{bc}} = \frac{1,23}{4} = 0,304 \text{ мм}^2;$$

$$q'_{cd} = \frac{I_{cd}}{j'_{cd}} = \frac{0,175}{4} = 0,0437 \text{ мм}^2.$$

Окончательные значения поперечных сечений и диаметров проводов по данным ГОСТа 2773—51 из Приложения I

$$q_{ab} = 0,273 \text{ мм}^2; \quad d_{ab}/d_{abи} = 0,59/0,64 \text{ мм};$$
$$q_{bc} = 0,301 \text{ мм}^2; \quad d_{bc}/d_{bcи} = 0,62/0,67 \text{ мм};$$
$$q_{cd} = 0,0440 \text{ мм}^2; \quad d_{cd}/d_{cdи} = 0,25/0,275 \text{ мм}.$$

Марка провода — ПЭЛ.

Окончательные плотности тока в проводах обмоток:

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = 0,907$

$$j_{ab} = \frac{I_{ab}}{q_{ab}} = \frac{1,07}{0,273} = 3,91 \text{ а/мм}^2; \quad j_{bc} = \frac{I_{bc}}{q_{bc}} = \frac{0,175}{0,301} =$$
$$= 0,58 \text{ а/мм}^2; \quad j_{cd} = \frac{I_{cd}}{q_{cd}} = \frac{0,175}{0,0440} = 3,97 \text{ а/мм}^2;$$

б) при $k_c \approx \frac{U_1}{U_c} = 1,1$

$$j_{ab} = 0; \quad j_{bc} = \frac{I_{bc}}{q_{bc}} = \frac{1,23}{0,301} = 4,08 \ a/мм^2;$$

$$j_{cd} = \frac{I_{cd}}{q_{cd}} = \frac{0,101}{0,0440} = 2,3 \ a/мм^2.$$

Таблица 4'

k	$\frac{U_1}{U_a} = 0,907$	$\frac{U_1}{U_c} = 1,1$
I_{ab}/j_{ab}	$\frac{1,07}{3,91}$	$\frac{0}{0}$
I_{bc}/j_{bc}	$\frac{0,175}{0,58}$	$\frac{1,23}{4,08}$
I_{cd}/j_{cd}	$\frac{0,175}{3,97}$	$\frac{0,101}{2,3}$

9. Высота окна сердечника автотрансформатора

$$H = \sqrt{k \cdot \frac{q_{ab}W_{ab} + q_{bc}W_{bc} + q_{cd}W_{cd}}{100\, k_{ок}}} =$$

$$= \sqrt{2,8 \cdot \frac{0,273 \cdot 125 + 0,301 \cdot 115 + 0,044 \cdot 1110}{100 \cdot 0,3}} \approx 3,4 \ см.$$

Ближайшие высота и ширина окна Ш-образных пластин «безотходной» штамповки с уширенным ярмом согласно Приложению IV:

$$H = 3,35 \ см; \quad a = 1,9 \ см; \quad c = 1,2 \ см; \quad h_я = 1,2 \ см;$$

$$b = \frac{S_c}{a} = \frac{3,9}{1,9} \approx 2,0 \ см; \quad S'_я = 0,92 \cdot bh_я =$$

$$= 0,92 \cdot 2 \cdot 1,2 = 2,2 \ см^2.$$

10. Проверка ширины окна сердечника

Число витков в слое части обмотки ab

$$n_3 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{abи}} = \frac{33,5 - 2 \cdot 2}{0,64} \approx 46;$$

число слоев этой части обмотки

$$m_3 = \frac{W_{ab}}{n_3} = \frac{125}{46} = 2,72 \approx 3;$$

толщина части обмотки *ab*

$$\delta_3 = m_3 d_{abи} = 3 \cdot 0{,}64 \approx 1{,}9 \text{ мм}.$$

Число витков в слое части обмотки *bc*

$$n_2 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{bcи}} = \frac{33{,}5 - 2 \cdot 2}{0{,}67} \approx 44;$$

число слоев этой части обмотки

$$m_2 = \frac{W_{bc}}{n_2} = \frac{115}{44} = 2{,}7 \approx 3;$$

толщина части обмотки *bc*

$$\delta_2 = m_2 d_{bcи} = 3 \cdot 0{,}67 \approx 2 \text{ мм}.$$

Число витков в слое части обмотки *cd*

$$n_1 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{cdи}} = \frac{33{,}5 - 2 \cdot 2}{0{,}275} = 107;$$

число слоев этой части обмотки

$$m_1 = \frac{W_{cd}}{n_1} = \frac{1110}{107} = 11;$$

толщина части обмотки *cd*

$$\delta_1 = m_1 d_{cdи} = 11 \cdot 0{,}275 \approx 3 \text{ мм}.$$

Ширина окна сердечника

$$c = k_2 (\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3) + \varepsilon_3 =$$
$$= 1{,}2 (1 + 3 + 0 + 2 + 0 + 1{,}9) + 2 = 11{,}6 \approx 12 \text{ мм},$$

где принято $\varepsilon_1 = 2$ *мм*; $\varepsilon_0 = 1{,}0$ *мм*; $\delta_{12} = \delta_{13} = 0$; $\varepsilon_3 = 2$ *мм*; $k_2 = 1{,}2$.

Материал для ε_0 и ε_1 — электрокартон ЭВ (ГОСТ 2824—60).

Отношение

$$k = \frac{H}{c} = \frac{33{,}5}{12} = 2{,}8.$$

11. Масса меди обмоток автотрансформатора

Обмотка из тонкой проволоки наматывается на стержень первой. Масса отдельных частей обмотки равна:

$$l_{wcd} = 2(a + b + 4\varepsilon_0 + 2\delta_1) = 2(1,9+2+4\cdot 0,1+2\cdot 0,3) \approx$$
$$\approx 10,0 \text{ см};$$

$$G_{кcd} = 8,9 W_{cd} q_{cd} l_{wcd} \cdot 10^{-5} = 8,9\cdot 1110\cdot 0,044\cdot 10,0\cdot 10^{-5} =$$
$$= 0,043 \text{ кг};$$

$$l_{wbc} = 2[a + b + 4(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12}) + 2\delta_2] =$$
$$= 2[1,9 + 2 + 4\cdot(0,1 + 0,3) + 2\cdot 0,2] \approx 12,0 \text{ см}.$$

$$G_{кbc} = 8,9 W_{bc} q_{bc} l_{wbc} \cdot 10^{-5} =$$
$$= 8,9\cdot 115\cdot 0,301\cdot 12,0\cdot 10^{-5} \approx 0,036 \text{ кг};$$

$$l_{wab} = 2[a + b + 4(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23}) - 2\delta_3] =$$
$$= 2[1,9 + 2 + 4(0,1 + 0,3 + 0,2) + 2\cdot 0,19] = 15,6 \text{ см};$$

$$G_{кab} = 8,9 W_{ab} q_{ab} \cdot l_{wab} \cdot 10^{-5} =$$
$$= 8,9\cdot 125\cdot 0,273\cdot 15,6\cdot 10^{-5} = 0,047 \text{ кг}.$$

Общая масса меди обмотки

$$G_к = G_{кcd} + G_{кbc} + G_{кab} =$$
$$= 0,043 + 0,036 + 0,047 = 0,126 \text{ кг}.$$

12. Потери в обмотке автотрансформатора при 75° С

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = 0,907$

$$P_{кab} = 2,4 j_{ab}^2 G_{кab} = 2,4\cdot 3,91^2\cdot 0,047 = 1,72 \text{ вт};$$
$$P_{кbc} = 2,4 j_{bc}^2 G_{кbc} = 2,4\cdot 0,58^2\cdot 0,036 = 0,29 \text{ вт};$$
$$P_{кcd} = 2,4 j_{cd}^2 G_{кcd} = 2,4\cdot 3,97^2\cdot 0,043 = 1,61 \text{ вт};$$

суммарные потери в обмотке

$$P_к = P_{кab} + P_{кbc} + P_{кcd} = 1,72 + 0,29 + 1,61 = 3,62 \text{ вт};$$

б) при $k_c \approx \frac{U_1}{U_c} = 1,1$

$$P_{кbc} = 2,4 j_{bc}^2 \cdot G_{кbc} = 2,4\cdot 4,08^2\cdot 0,036 = 1,45 \text{ вт};$$
$$P_{кcd} = 2,4 j_{cd}^2 \cdot G_{кcd} = 2,4\cdot 2,3^2\cdot 0,043 = 0,54 \text{ вт};$$

суммарные потери в меди обмотки

$$P'_к = P_{кbc} + P_{кcd} = 1,45 + 0,54 = 1,99 \text{ вт}.$$

13. Масса сердечника автотрансформатора и магнитные потери в нем

Масса стержня сердечника

$$G_{\text{с.с}} = 7{,}6HS'_{\text{с}} \cdot 10^{-3} = 7{,}6 \cdot 3{,}35 \cdot 3{,}6 \cdot 10^{-3} \approx 0{,}095 \ \textit{кг};$$

масса ярем сердечника

$$G_{\text{с.я}} = 2 \cdot 7{,}6\,(H + l_{\text{я}})\, S'_{\text{я}} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 2 \cdot 7{,}6\,(3{,}35 + 6{,}7) \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-3} \approx 0{,}344 \ \textit{кг};$$

$$l_{\text{я}} = a + 2c + 2h_{\text{я}} = 1{,}9 + 2 \cdot 1{,}2 + 2 \cdot 1{,}2 = 6{,}7 \ \textit{см};$$

общая масса стали сердечника

$$G_{\text{с}} = G_{\text{с.с}} + G_{\text{с.я}} = 0{,}095 + 0{,}344 \approx 0{,}44 \ \textit{кг}.$$

Магнитные потери в сердечнике и ярме

$$P_{\text{с.с}} = k_{\text{с}} B_{\text{с}}^2 \cdot G_{\text{с.с}} = 1{,}6 \cdot 1{,}3^2 \cdot 0{,}095 = 0{,}257 \ \textit{вт};$$

$$P_{\text{с.я}} = k_{\text{с}} B_{\text{я}}^2 \cdot G_{\text{с.я}} = 1{,}6 \cdot 1{,}065^2 \cdot 0{,}344 = 0{,}620 \ \textit{вт};$$

$$B_{\text{я}} = B_{\text{с}} \cdot \frac{S'_{\text{с}}}{2S'_{\text{я}}} = 1{,}3 \cdot \frac{3{,}6}{2 \cdot 2{,}2} = 1{,}065 \ \textit{тл};$$

полные магнитные потери в сердечнике

$$P_{\text{с}} = P_{\text{с.с}} + P_{\text{с.я}} = 0{,}257 + 0{,}620 \approx 0{,}88 \ \textit{вт}.$$

14. Ток холостого хода автотрансформатора

$$I_0 \approx I_{\mu} = \frac{aw_{\text{с}} l'_{\text{с}} + aw_{\text{я}} l'_{\text{я}} + 0{,}8 B_{\text{с}} n \delta_{\text{э}} 10^4}{\sqrt{2}\, W_1} =$$

$$= \frac{6{,}8 \cdot 3{,}35 + 2{,}2 \cdot 10 + 0{,}8 \cdot 1{,}3 \cdot 2 \cdot 0{,}004 \cdot 10^4}{\sqrt{2} \cdot 1125} \approx 0{,}075 \ a,$$

где $l'_{\text{с}} = H = 3{,}35$ *см*; $aw_{\text{с}} = 6{,}8$; $aw_{\text{я}} = 2{,}2$ — по кривой рис. 42 для стали марки Э41; $l'_{\text{я}} = H + l_{\text{я}} = 3{,}35 + 6{,}7 \approx$ $\approx 10{,}0$ *см*; $I_{\mu}\% = \frac{I_{\mu}}{I_1} \cdot 100 = \frac{0{,}075}{1{,}23} \cdot 100 \approx 6\%$.

15. Коэффициент полезного действия автотрансформатора

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = 0{,}907$

$$\eta = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{P_2 \cos \varphi_2 + P_{\text{с}} + P_{\text{к}}}\, 100 =$$

$$= \frac{150 \cdot 1}{150 \cdot 1 + 0{,}88 + 3{,}62}\, 100 = 97{,}0\%;$$

б) при $k_c \approx \frac{U_1}{U_c} = 1,1$

$$\eta = \frac{P_2 \cos\varphi_2}{P_2 \cos\varphi_2 + P_c + P'_к} 100 =$$

$$= \frac{150 \cdot 1}{150 \cdot 1 + 0,88 + 1,99} \cdot 100 = 98,0\%.$$

16. Изменение напряжения при нагрузке

а) при $k_a \approx \frac{U_1}{U_a} = 0,907$

$$e_a\% = \frac{P_к}{P_2} 100 = \frac{3,62}{150} 100 \approx 2,4\%;$$

$$\Delta U\% \approx e_a\% \cos\varphi_1 \approx 2,4\%;$$

б) при $k_c \approx \frac{U_1}{U_c} = 1,1$

$$e'_a\% = \frac{P'_к}{P_2} 100 = \frac{1,99}{150} 100 \approx 1,3\%;$$

$$\Delta U'\% \approx e'_a\% \cos\varphi_1 \approx 1,3\%.$$

17. Проверка автотрансформатора на нагревание

$$\theta = \frac{P_c + P_к}{13 \cdot 10^{-4} (S_{сер} + S_{обм})} + \Delta\theta^\circ =$$

$$= \frac{0,88 + 3,62}{13 \cdot 10^{-4} (110 + 47)} + 15^\circ \approx 37^\circ C,$$

где

$$S_{сер} \approx 2 (b + 2h_я) l_я + 4 (b + h_я) H + 4bh_я =$$
$$= 2 (2 + 2 \cdot 1,2) 6,7 + 4 (2 + 1,2) 3,35 +$$
$$+ 4 \cdot 2 \cdot 1,2 = 110 \text{ см}^2;$$

$$S_{обм} \approx 2 [a + b + 4 (\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{23} + \delta_3)] \cdot H =$$
$$= 2 [1,9 + 2 + 4 (0,1 + 0,3 + 0 + 0,2 + 0 + 0,19)] \times$$
$$\times 3,35 = 47 \text{ см}^2.$$

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПИКОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Под пиковым трансформатором понимается специальный тип трансформатора, который служит для преобразования первичного напряжения синусоидальной формы во

вторичное напряжение с крутым фронтом волны в виде пика. Эти трансформаторы получили практическое применение в установках с тиратронами и ртутными выпрямителями, снабженными регулирующими сетками, и являются в них одним из необходимых элементов. Они также встречаются в индикаторных схемах некоторых радиоустройств для преобразования синусоидальных колебаний напряжения в импульсные.

Принцип получения пиковой формы кривой напряжения в трансформаторе основывается на уплощении кривой потока в его сердечнике во времени. Известно,

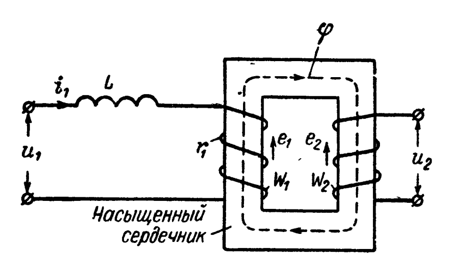


Рис. 25. Пиковый трансформатор стержневого типа с индуктивностью в первичной цепи.

что при последовательном соединении первичной обмотки трансформатора с индуктивностью неизменной величины (рис. 25) и при синусоидальном общем напряжении кривая потока во времени в сердечнике трансформатора уплощается, а кривые первичного и вторичного напряжений, как производные от потока по времени, заостряются. Этот принцип и лежит в основе работы пиковых трансформаторов. В самом деле, если приложенное к первичной цепи пикового трансформатора (рис. 25) напряжение имеет вид

$$u_1 = U_1 \sqrt{2} \sin \omega t,$$

то уравнение равновесия напряжений в этой цепи будет иметь следующий вид:

$$U_1 \sqrt{2} \sin \omega t = W_1 \frac{d\varphi}{dt} + i_1 r_1 + L \frac{di_1}{dt}, \qquad (20)$$

где L — суммарная индуктивность внешней катушки и рассеяния первичной обмотки трансформатора.

После интегрирования уравнения (20) при условии пренебрежения активным сопротивлением первичной цепи трансформатора ($r_1 \approx 0$) получается следующее уравнение потокосцеплений в этой цепи в вольт-секундах или веберах:

$$\Psi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = W_1 \varphi + L i_1, \qquad (21)$$

где $\Psi_m = \frac{U_1 \sqrt{2}}{\omega}$ — амплитуда суммарного значения потокосцеплений в первичной цепи в веберах.

На рис. 26 представлены кривые намагничивания отдельных элементов трансформатора: сердечника $W_1\varphi =$

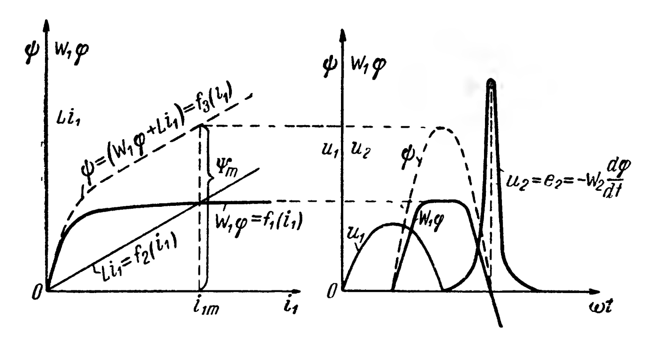


Рис. 26. Принцип получения напряжений пиковой формы.

$= f_1(i_1)$, индуктивной катушки $Li_1 = f_2(i_1)$ и суммарная кривая $\psi = f_3(i_1)$ и зависимости потокосцеплений во времени. Кривая потокосцеплений сердечника трансформатора уплощается во времени, а кривая вторичного напряжения, как производная от этого потока по времени, заостряется. Чем больше величина постоянной индуктивности в первичной цепи трансформатора, тем более уплощается кривая потока во времени в сердечнике и заостряется кривая э. д. с. Этот принцип, как указывалось, и лежит в основе работы пиковых трансформаторов. Эти трансформаторы обычно выполняются однофазными.

По конструкции сердечника однофазные пиковые трансформаторы могут быть следующих типов:

а) трансформаторы стержневого типа

1) с последовательно включенной в первичную цепь индуктивной катушкой без стального сердечника (рис. 25);

2) с магнитными шунтами (рис. 27, *а* и *б*);

б) трансформаторы броневого типа с магнитными шунтами (рис. 28, *а* и *б*).

Для сердечников таких трансформаторов целесообразно применять специальные магнитные сплавы, как, например, пермаллой и т. д., которые быстро насыща-

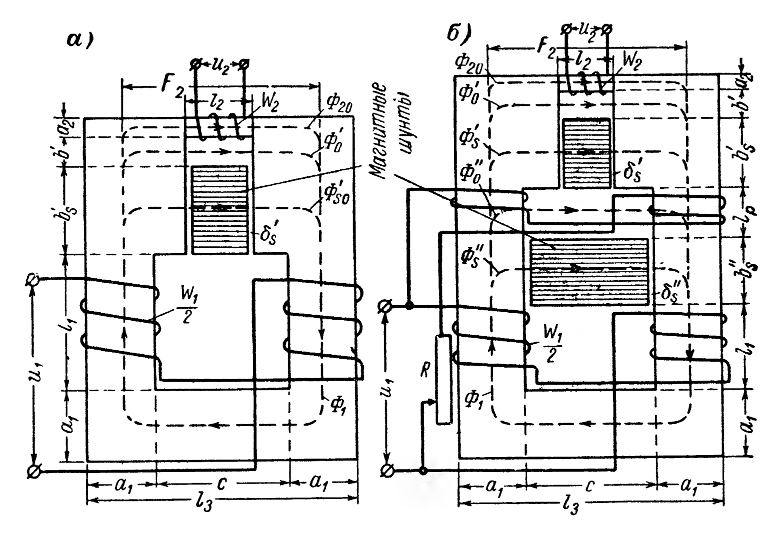


Рис. 27. Пиковые трансформаторы стержневого типа: *а* — без регулирования; *б* — с регулированием выпрямленного тока.

ются при превышении определенного значения м. д. с. намагничивающей обмотки.

Пиковые трансформаторы с магнитными шунтами имеют некоторые преимущества перед стержневым трансформатором с отдельной индуктивной катушкой в первичной цепи, так как в них может отсутствовать такая катушка и требуется значительно меньше специального сплава для сердечника.

На рис. 27 и 28 представлены пиковые трансформаторы стержневого и броневого типов с магнитными шунтами. Главные стержни, ярма и магнитные шунты этих трансформаторов изготовляются из обыкновенной

листовой горячекатаной электротехнической стали марок Э41 и Э42 толщиной листа 0,35 *мм* (ГОСТ 802—58, Приложение V), а стержни, на которых расположены вторичные обмотки, целесообразно изготовлять из специального сплава, как, например, пермаллой и др. Они могут изготовляться также и из обыкновенной электротехнической стали, как и другие части сердечника пикового трансформатора.

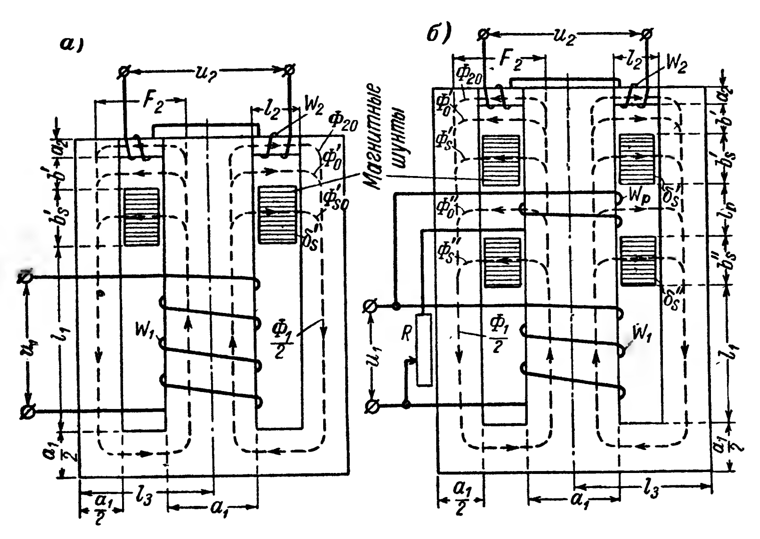


Рис. 28. Пиковые трансформаторы броневого типа: *а* — без регулирования; *б* — с регулированием выпрямленного тока.

Толщина пакетов вторичных стержней этих трансформаторов, вследствие их малого поперечного сечения, обычно меньше пакета главных стержней, поэтому в собранном сердечнике вторичные стержни имеют вид узких перешейков, охватываемых вторичными катушками. Сборка сердечника производится вперeплет. В окнах сердечника трансформатора между первичной и вторичной обмотками помещаются магнитные шунты, которые представляют собой пакеты полосок из листовой электротехнической стали (рис. 27 и 28).

На рис. 29 представлены кривые первичного и вторичного потоков и напряжений при холостом ходе пикового трансформатора. Когда вторичные стержни

насыщаются, первичный поток в основном проходит через магнитные шунты и торцы окна сердечника,

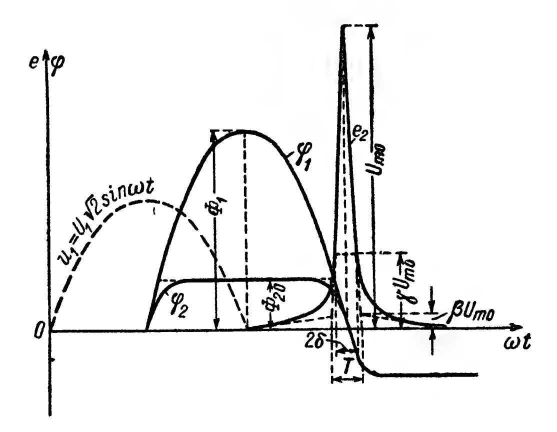


Рис. 29. Кривые во времени потоков и вторичной э. д. с. пикового трансформатора.

а кривая вторичного потока во времени уплощается. При быстром изменении вторичного потока от положительного значения к отрицательному или наоборот во вторичной обмотке индуктируется э. д. с. пиковой формы во времени. Ее максимум совпадает с моментом прохождения вторичного потока через нулевое значение.

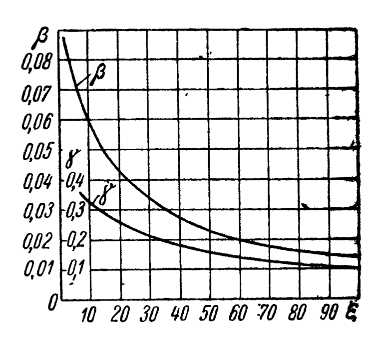


Рис. 30. Кривые коэффициентов β и γ при изготовлении вторичных стержней из обыкновенной трансформаторной стали.

Как показывает рис. 29, ширина пика кривой вторичной э. д. с. 2δ на высоте γU_{m0} от основания зависит от амплитуды кривой вторичного потока Φ_{20}. Начиная с высоты γU_{m0} от основания, пик кривой э. д. с. имеет до самой вершины практически форму узкого треугольника с высотой $(1-\gamma)U_{m0}$. Величина γ зависит от материала

вторичного стержня и средней скорости изменения вторичного напряжения и может быть определена по эмпирической кривой.

На рис. 30 представлены эмпирические кривые коэффициентов β и γ, указанных на рис. 29, в зависимости от средней скорости изменения вторичного напряжения ξ в случае вторичных стержней пикового трансформатора из обыкновенной электротехнической стали марок Э41 и Э42 толщиной листа 0,35 *мм* (ГОСТ 802—58, Приложение V). Эти коэффициенты можно аналитически представить следующими приближенными эмпирическими формулами:

а) для обыкновенной электротехнической стали

$$\beta = \frac{1,5}{15+\xi}; \quad \gamma = \frac{13}{30+\xi}; \qquad (22а)$$

б) для пермаллоя разных марок

$$\beta = \frac{0,7}{15+\xi}; \quad \gamma = \frac{6}{30+\xi}. \qquad (22б)$$

Средняя скорость изменения вторичного напряжения ξ определяется отношением удвоенной амплитуды напряжения U_{m0} к ширине основания треугольника T в градусах, вписанного в пиковую кривую и лежащего основанием на оси абсцисс.

Из рис. 29 при холостом ходе трансформатора следует:

$$\xi_0 = \frac{2U_{m0}}{T} = \frac{(1-\gamma)\,U_{m0}}{\delta}\ [в/град], \qquad (23)$$

где δ — половина ширины пика вторичного напряжения в градусах на высоте γU_{m0} от основания, соответствующая ординате синусоидальной кривой первичного потока сердечника трансформатора, отсекаемой горизонтальной прямой, проходящей через амплитудное значение вторичного потока Φ_{20}.

В связи с этим амплитуды первичного и вторичного потоков в сердечнике пикового трансформатора связаны

следующим соотношением (рис. 29):

$$\sin\delta \approx \frac{\Phi_{20}}{\Phi_1} = \frac{B_2 S_2}{B_1 S_1}, \quad (24)$$

где B_1 и B_2 — амплитуды индукций в главном и вторичном стержнях трансформатора, *тл*; S_1 и S_2 — поперечные сечения указанных стержней, *см*^{2}.

При этом в случае пикового трансформатора броневого типа в уравнение (24) нужно подставить половину сечения главного стержня $\frac{S_1}{2}$ или половину амплитуды первичного потока $\frac{\Phi_1}{2}$.

При расчете пиковых трансформаторов на повышенные частоты порядка нескольких единиц или десятков килогерц вместо средней скорости изменения вторичного напряжения пикового трансформатора в *в/град* при необходимости можно пользоваться также понятием средней крутизны этого напряжения в *в/мксек*. Если выразить ширину основания, вписанного в пиковую кривую треугольника T (рис. 29), в *мксек* с помощью соотношения $t' = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{T}{\omega} 10^6$, то средняя крутизна вторичного напряжения пикового трансформатора в *в/мксек* будет

$$\xi_0' = \frac{2U_{m0}}{t'} = 360f \cdot 10^{-6} \cdot \xi_0 \ [\text{в/мксек}], \quad (25)$$

где ξ_0 — средняя скорость изменения вторичного напряжения трансформатора, *в/град*; f — частота питающей сети, *гц*.

Уравнение (25) удобно выражает взаимную связь между средними скоростями изменения вторичного напряжения пикового трансформатора, заданными в *в/град* или в *в/мксек*, и, следовательно, позволяет пользоваться приводимой здесь методикой расчета трансформатора при любой форме задания этой величины.

Для целей регулирования величины выпрямленного тока тиратронов и ртутных выпрямителей с помощью имеющихся в них сеток необходимо изменять фазу кривой импульсного напряжения, подводимого к сетке, относительно выпрямляемого напряжения. Пиковые трансформаторы с магнитными шунтами при

соответствующем устройстве могут выполнять также и эту функцию.

На рис. 27,*б* и 28,*б* представлены такие трансформаторы с регулируемой фазой пиковой кривой вторичного напряжения. На главных стержнях трансформаторов помещается регулировочная обмотка, отделенная от первичной дополнительными магнитными шунтами. Эта обмотка включается через регулируемое активное сопротивление на то же напряжение, что и первичная обмотка трансформатора.

Изменение фазы пиковой кривой вторичного напряжения здесь основано на смещении по фазе вторичного потока относительно первичного путем наложения на последний дополнительного потока регулировочной обмотки, имеющего другую фазу и изменяемую величину. В этом случае через вторичный стержень будет проходить результирующий поток, представляющий собой геометрическую сумму указанных потоков. Фаза этого потока может изменяться величиной тока регулировочной обмотки посредством изменения последовательно с ней включенного активного сопротивления. При этом с изменением фазы будет также изменяться и величина результирующего потока, проходящего через вторичный стержень трансформатора.

I. РАСЧЕТ ПИКОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Исходные данные для расчета пикового трансформатора:

первичное напряжение U_1 [*в*];

амплитуда вторичного пикового напряжения при нагрузке U_m [*в*];

действующее значение вторичного тока нагрузки I_2 [*а*];

средняя скорость изменения вторичного напряжения при нагрузке ξ [*в/град*];

частота питающей сети f [*гц*];

наибольший сдвиг фазы вторичного напряжения в случае регулируемого трансформатора θ_m [*град*].

Величины амплитуд и средних скоростей изменения вторичного напряжения, а также действующие значения вторичного тока нагрузки пиковых трансформаторов в зависимости от области применения последних обычно находятся в пределах, указанных в табл. 9,

Таблица 9

Применение пикового трансформатора	U_m, в	ξ, в/град	I_2, а
Для тиратронов	30—50 50—100 свыше 100	10—20 20—40 40—80	0,01—0,20
Для ртутных выпрямителей	150—250 250—500	10—20 20—40	0,05—0,80

Кроме указанных данных, при расчете пикового трансформатора необходимо знать также коэффициент формы кривой k_f и коэффициент амплитуды k_a вторичного напряжения при заданной амплитуде и средней скорости изменения этого напряжения. Эти коэффициенты можно определить аналитически в зависимости от вида пиковой кривой вторичного напряжения (рис. 29).

После замены действительной пиковой кривой вторичного напряжения вписанным пунктирным треугольником (рис. 29) аналитическое вычисление, с учетом закруглений кривой у основания и опытных данных, дает для этих коэффициентов следующие приближенные формулы, достаточно точные для практических расчетов:

$$k_f = \frac{2\sqrt{30U_m\xi}}{1,5U_m + 90\beta\xi}; \qquad (26)$$

$$k_a = \sqrt{\frac{270\xi}{U_m}}; \qquad (27)$$

$$k_0 = k_a k_f = \frac{180\xi}{1,5U_m + 90\beta\xi}, \qquad (28)$$

где коэффициент β определяется в зависимости от средней скорости изменения вторичного напряжения ξ по опытной кривой рис. 30 или эмпирическим формулам (22а) — в случае выполнения вторичного стержня из обыкновенной электротехнической стали, или по эмпирическим формулам (22б) — для вторичного стержня из пермаллоя разных марок.

1. Типы пиковых трансформаторов

Как указывалось, по конструкции сердечника пиковые трансформаторы с магнитными шунтами могут быть стержневого и броневого типов (рис. 27 и 28).

Пиковые трансформаторы стержневого типа имеют определенные преимущества перед трансформаторами броневого типа в отношении простоты конструкции в целом, меньшего расхода меди для обмоток и лучших условий охлаждения. В связи с этим при выборе типа пикового трансформатора предпочтительнее останавливаться на стержневом типе.

Материалом для главных стержней, ярем и магнитных шунтов этих трансформаторов, как указывалось, является обыкновенная листовая горячекатаная электротехническая сталь марок Э41 и Э42 толщиной листа 0,35 *мм*; для вторичных стержней целесообразно применять специальные магнитные сплавы, например, пермаллой и др.

2. Определение поперечного сечения вторичного стержня трансформатора

Поперечное сечение вторичного стержня пикового трансформатора определяется по следующей формуле, представляющей собой видоизменение известной формулы для нормального силового трансформатора:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 27)

$$S_2 = 5{,}4 \sqrt{\frac{U_m I_2 \alpha}{k_0 f j_2 B_2}}\ [см^2];$$

б) для трансформатора броневого типа (рис. 28)

$$S_2 = 3{,}8 \sqrt{\frac{U_m I_2 \alpha}{k_0 f j_2 B_2}}\ [см^2],$$

где U_m и I_2 — заданные амплитуда вторичного напряжения и действующее значение тока нагрузки; f — частота питающей сети, *гц*; $k_0 = k_a k_f$ определяется по уравнению (28); $j_2 = 1{,}8 \div 2{,}6$ *а/мм*^{2} — плотность тока в проводнике вторичной обмотки; B_2 — амплитуда индукции насыщения во вторичном стержне, которая находится в следующих пределах: 1) для обыкновенной горячекатаной электротехнической стали марок Э41 и Э42 (см. рис. 42) $B_2 = 1{,}8 \div 2{,}0$ *тл*; 2) для пермаллоя разных марок (см. рис. 43) $B_2 = 0{,}8 \div 1{,}1$ *тл*; $\alpha = \frac{G_{c2} l_{w2}}{G_{к2} l_2} = 2{,}4 \div 5{,}2$; G_{c2} — масса стали вторичного

стержня; $G_{к2}$ — масса меди обмотки этого стержня; l_{w2} — средняя длина витка вторичной катушки; l_2 — длина вторичного стержня.

Меньшие значения α относятся к меньшим плотностям тока в проводниках вторичной обмотки и к бо́льшим амплитудам вторичного напряжения, бо́льшие значения α — к бо́льшим плотностям тока и меньшим амплитудам напряжения.

Поперечное сечение вторичного стержня пикового трансформатора выполняется прямоугольной формы с соотношением сторон $\zeta = \frac{b_2}{a_2} = 3 \div 4$ и более. Размеры этого сечения были следующими:

$$a_2 = \sqrt{\frac{S_2}{k_з \zeta}} \ [см]; \quad b_2 = \zeta a_2 \quad [см],$$

где $k_з = 0{,}88 \div 0{,}92$ — коэффициент заполнения поперечного сечения стержня сталью.

3. Определение числа витков вторичной обмотки

Число витков одной вторичной катушки пикового трансформатора определяется следующим образом:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 27)

$$W_2 = \frac{U_m}{4k_0 f \Phi_2};$$

б) для трансформатора броневого типа (рис. 28)

$$W_2 = \frac{U_m}{8k_0 f \Phi_2},$$

где $\Phi_2 = B_2 S_2 \cdot 10^{-4}$ — вторичный поток одного стержня при нагрузке, *вб*, U_m и f заданы, B_2 и S_2 берутся из позиции 2, $k_0 = k_a k_f$ определяется по уравнению (28).

4. Определение сечения и диаметра провода вторичной обмотки и длины вторичного стержня

Предварительное значение поперечного сечения провода вторичной обмотки

$$q_2' = \frac{I_2}{j_2} \ [мм^2],$$

где I_2 задано, $j_2 = 1{,}8 \div 2{,}6$ *а/мм²* — плотность тока в проводе вторичной обмотки.

Окончательные значения сечения и диаметра этого провода выбираются по ближайшим данным ГОСТа из Приложения I:

$$q_2 = \ldots [мм^2]; \quad d_2/d_{2и} = \ldots [мм].$$

После выбора диаметра провода производится размещение обмотки на вторичном стержне. Длина стержня l_2 должна быть по возможности минимальной в целях уменьшения намагничивающей м. д. с., радиальная высота катушки — не слишком большой во избежание искажения пиковой кривой вторичного напряжения торцевым потоком окна сердечника трансформатора.

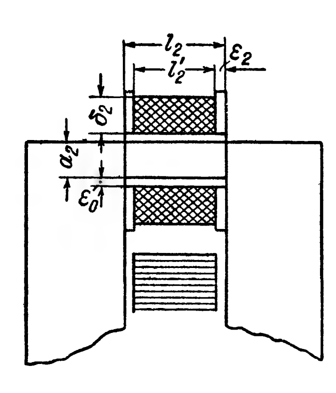


Рис. 31. Размеры вторичной катушки пикового трансформатора.

Для определения длины вторичного стержня l_2 можно принять следующее ориентировочное отношение числа витков в слое вторичной катушки к числу слоев в ней:

$$\zeta' = \frac{n_2}{m_2} = 2 \div 3,$$

тогда число витков в слое этой катушки

$$n_2 = \sqrt{\zeta' W_2}$$

и число слоев

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2},$$

где W_2 берется из позиции 3 главы пятой.

Длина вторичного стержня, занимаемая обмоткой (рис. 31),

$$l_2' = n_2 d_{2и} \quad [см].$$

Полная длина вторичного стержня (рис. 31)

$$l_2 = l_2' + 2\varepsilon_2,$$

где $\varepsilon_2 = 1{,}0 \div 2{,}0$ *мм* — толщина щеки каркаса вторич-

ной катушки, выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824—60, Приложение VII).

Толщина вторичной обмотки (рис. 31)

$$\delta_2 = m_2 d_{2и} \quad [см].$$

Б. Определение поперечного сечения главного стержня

При нагрузке пикового трансформатора вторичный поток (рис. 27 и 28), вследствие наличия магнитных шунтов, под влиянием вторичного тока несколько смещается по фазе в сторону отставания от первичного потока. Последний равен геометрической сумме вторичного и суммарного потоков через магнитные шунты и торцы окна сердечника. При холостом ходе трансформатора первичный поток практически равен алгебраической сумме указанных потоков. Крутизна кривой вторичного потока во времени в месте прохождения ее через нулевое значение в этом случае увеличивается, и пик кривой вторичного напряжения становится более высоким и узким.

Высота пика кривой напряжения при холостом ходе, как показывают осциллограммы, может составлять $1{,}2 \div 1{,}4$ значения его при нагрузке, а ширина основания треугольника, вписанного в этот пик (рис. 29), $0{,}7 \div 0{,}9$ значения его при нагрузке. Меньшие возрастания пика и уменьшения его ширины при холостом ходе относятся к меньшим значениям средних скоростей изменения вторичного напряжения, а большие возрастания пика и уменьшения его ширины — к большим значениям средних скоростей, указанным в табл. 9.

Таким образом, при холостом ходе пикового трансформатора амплитуда и средняя скорость изменения вторичного напряжения будут:

$$U_{m0} = \mu U_m \quad [в]; \quad \xi_0 = \frac{\mu}{\eta} \cdot \xi \quad [в/град],$$

где U_m и ξ заданы, $\mu = 1{,}2 \div 1{,}4$, $\eta = 0{,}7 \div 0{,}9$; μ и η выбираются так, чтобы их произведение было меньше единицы.

Тогда вторичный поток одного стержня при холостом ходе по позиции 3

$$\Phi_{20} = \Phi_{2\mu} \cdot \frac{k_0}{k_0'} \; [вб],$$

где Φ_2 берется из позиции 3 главы пятой, k'_0 — коэффициент по уравнению (28) при значениях U_m и ξ, равных U_{m0} и ξ_0.

Амплитуда первичного потока по уравнению (24) будет:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 27)

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_{20}}{\sin\frac{(1-\gamma)\,U_{m0}}{\xi_0}} \quad [вб];$$

б) для трансформатора броневого типа (рис. 28)

$$\Phi_1 = \frac{2\Phi_{20}}{\sin\frac{(1-\gamma)\,U_{m0}}{\xi_0}} \quad [вб].$$

Поперечное сечение главного стержня

$$S_1 = \frac{\Phi_1 10^4}{B_1} \quad [см^2],$$

где $B_1 = 1{,}0 \div 1{,}2$ *тл* — амплитуда индукции в главном стержне при выполнении его из обыкновенной листовой электротехнической стали.

Форму поперечного сечения главного стержня целесообразно принимать квадратной, а индукцию в ярмах — равной индукции в этом стержне. Тогда размеры сечения главного стержня будут:

$$a_1 = b_1 = \sqrt{\frac{S_1}{k_з}} \quad [см],$$

где $k_з = 0{,}88 \div 0{,}92$ — коэффициент заполнения поперечного сечения стержня сталью.

6. Определение числа витков первичной обмотки

Число витков первичной обмотки трансформатора определяется по известной формуле

$$W_1 = \frac{U_1}{4{,}44 f \Phi_1},$$

где Φ_1 берется из позиции 5.

7. Определение сечения и диаметра провода первичной обмотки и размещение ее на главных стержнях

Действующее значение первичного тока пикового трансформатора можно предварительно определить так:

$$I_1 \approx \frac{(1{,}1 \div 1{,}3)\, F_2}{\sqrt{2} \cdot W_1} \quad [a].$$

М. д. с. при холостом ходе, соответствующая участку вторичной магнитной цепи (рис. 27 и 28), при сборке сердечника впереплет определяется следующим образом:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 27)

$$F_2 \approx aw_2 \cdot l_2 + aw_{\text{ср}} \cdot a_1 + 0{,}8 B_{20} \delta_э 10^4;$$

б) для трансформатора броневого типа (рис.28)

$$F_2 \approx aw_2 \cdot l_2 + aw_{\text{ср}} \cdot \frac{a_1}{2} + 0{,}8 B_{20} \delta_э 10^4,$$

где l_2 берется из позиции 4; a_1 — из позиции 5; W_1 — из позиции 6; aw_2 — удельная м. д. с., соответствующая индукции B_{20}, определяемая по кривым намагничивания рис. 42 или 43; B_{20} — амплитуда индукции во вторичном стержне при холостом ходе трансформатора в теслах, определяемая по потоку Φ_{20} из позиций 5 и сечению стержня S_2 — из позиции 2; $aw_{2\text{ср}}$ — средняя удельная м. д. с. на участке перехода вторичного потока от середины главного стержня или ярма к вторичному стержню; $aw_{\text{ср}} \approx \frac{4aw_2' + aw_2}{6}$, aw_2' — удельная м. д. с., соответствующая индукции B_{20}', определяемая по кривым намагничивания рис. 42 или 43; B_{20}' — средняя амплитуда индукции на участке перехода вторичного потока от середины главного стержня или ярма к вторичному стержню, *тл*; $B_{20}' = \frac{B_{20}}{2}\left(1 + \frac{b_2}{a_1}\right)$; $\delta_э$ — длина эквивалентного воздушного зазора при сборке сердечника впереплет; $\delta_э \approx 0{,}0035 \div 0{,}0040$ *см*; b_2 берется из позиции 2.

Предварительное значение поперечного сечения провода первичной обмотки

$$q_1' = \frac{I_1}{j_1} \quad [\text{мм}^2],$$

где $j_1 = 1,8 \div 2,4$ $a/мм^2$ — плотность тока в проводе первичной обмотки.

Окончательные значения сечения и диаметра этого провода выбираются по ближайшим данным ГОСТа из Приложения I:

$$q_1 = \ldots [мм^2]; \quad d_1/d_{1и} = \ldots [мм].$$

При размещении первичной обмотки на главных стержнях сердечника пикового трансформатора следует иметь в виду, что длина вторичного стержня l_2 (рис. 27 или 28) является ограниченной, и поэтому ширина окна сердечника в некоторых случаях может оказаться недостаточной для удобного размещения этой обмотки. Так, например, в трансформаторах стержневого типа для рационального размещения первичной и регулировочной обмоток на главных стержнях обычно приходится в этом месте расширять окно сердечника (рис. 27). В трансформаторах броневого типа ширина окна, определяемая длиной вторичного стержня, оказывается обычно достаточной (рис. 28).

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 27).

Длина, занимаемая первичной обмоткой по высоте главного стержня, обычно составляет величину

$$l_1 \approx (1,2 \div 1,6) \cdot a_1 \quad [см],$$

где a_1 берется из позиции 5.

Число витков первичной обмотки в одном слое

$$n_1 = \frac{l_1 - 2\varepsilon_1}{d_{1и}},$$

где $\varepsilon_1 = 1,0 \div 2,0$ $мм$ — толщина щеки каркаса первичной катушки, выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824—60, Приложение VII).

Число слоев первичной обмотки на стержне

$$m_1 = \frac{W_1}{2n_1},$$

толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = m_1 d_{1и} \quad [см].$$

Ширина окна сердечника трансформатора в месте размещения первичной обмотки

$$c = 2(\varepsilon_0' + \delta_1) + \varepsilon_3 \quad [см],$$

где W_1 берется из позиции 6; ε_0' — толщина изоляции между первичной катушкой и стержнем, выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824—60, Приложение VII); $\varepsilon_0' = 1{,}0 \div 1{,}5$ *мм*; ε_3 — расстояние между первичными катушками двух стержней в окне сердечника трансформатора; $\varepsilon_3 = 3{,}0 \div 4{,}0$ *мм*.

б) Трансформатор броневого типа (рис. 28).

Число слоев первичной обмотки на стержне

$$m_1 = \frac{l_2 - \varepsilon_0' - \varepsilon_3}{d_{1и}}$$

с округлением до ближайшего целого числа.

Число витков первичной обмотки в одном слое

$$n_1 = \frac{W_1}{m_1}.$$

Длина, занимаемая первичной обмоткой по высоте главного стержня,

$$l_1 = n_1 d_{1и} + 2\varepsilon_1 \quad [см].$$

Толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = m_1 d_{1и} \quad [см],$$

где l_2 берется из позиции 4, W_1 — из позиции 6, ε_0', ε_1 и ε_3 — как и в случае трансформатора стержневого типа.

В пиковых трансформаторах с регулируемой фазой вторичного напряжения (рис. 27, *б* и 28, *б*) при определении окончательной длины главных стержней необходимо предусмотреть соответствующее место для размещения дополнительных магнитных шунтов и регулировочной обмотки, как показано ниже.

8. Определение размеров магнитных шунтов нерегулируемых трансформаторов

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 27, *а*).

Из рис. 27, *а* для амплитуд потоков при холостом ходе следует, что

$$\Phi_1 = \Phi_{20} + \Phi_0' + \Phi_{s0}' \quad [вб].$$

Так как на всех трех параллельных участках (см. рис. 27, *а*) практически действует м. д. с. F_2,

определяемая позицией 7а, то можно написать:

$$F_2 = 0{,}8\frac{\Phi_0'}{S'} k_2 l_2 \cdot 10^8 = 0{,}8\frac{\Phi_{s0}'}{S_s'} 2\delta_s' k_s' \cdot 10^8,$$

где S' — сечение торца окна между вторичным стержнем и магнитным шунтом в квадратных сантиметрах, определяемое из условия размещения вторичной катушки; $S' = b_1 b' + (b_1 - b_2) a_2$; S_s' — поперечное сечение магнитного шунта, параллельное торцу окна сердечника, *см*^{2}; δ_s' — длина одностороннего воздушного зазора магнитного шунта, *см*; k_2 и k_s' — коэффициенты, учитывающие

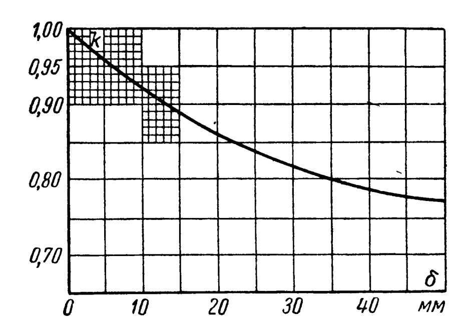


Рис. 32. Кривые коэффициента k.

неравномерность распределения потока у краев воздушных зазоров, определяемые по кривой рис. 32.

После преобразования написанных в этой позиции уравнений получаем:

$$\frac{S_s'}{\delta_s' k_s'} = \frac{1{,}6\,(\Phi_1 - \Phi_{20}) \cdot 10^8}{F_2} - \frac{2S'}{\cdot k_2 l^2},$$

где $\delta_s' = (0{,}02 \div 0{,}10) \cdot l_2$; a_2 и b_2 берутся из позиции 2, l_2 — из позиции 4, Φ_1, Φ_{20} и b_1 — из позиции 5, F_2 — из позиции 7, *а*, b' — согласно рис. 27, *а*.

Задаваясь значением δ_s' и определяя коэффициенты k_s' и k_2 по кривой рис. 32, можно вычислить поперечное сечение магнитного шунта S_s' и толщину его пакета b_s' (рис. 27, *а*).

б) Трансформатор броневого типа (рис. 28, *а*).

Из рис. 28, *а* для амплитуд потоков при холостом ходе следует, что

$$\frac{\Phi_1}{2}=\Phi_{20}+\Phi_0'+\Phi_{s0}' \quad [вб],$$

тогда, как и в случае трансформатора стержневого типа, получаем:

$$\frac{S_s'}{\delta_s' k_s'}=\frac{0{,}8\,(\Phi_1-2\Phi_{20})\cdot 10^8}{F_2}-\frac{2S'}{k_2 l_2},$$

где значения δ_s', k_s', k_2, S' и другие определяются, как и в предыдущем случае, а F_2 берется из позиции 7б.

9. Определение числа витков, диаметра провода и размещение на главном стержне регулировочной обмотки регулируемых трансформаторов

Как указывалось, регулирование фазы вторичного напряжения пикового трансформатора осуществляется с помощью дополнительной обмотки, помещаемой на главных стержнях между первичной и вторичной обмотками (рис. 27, *б* и 28, *б*).

Расчет и опыт показывают, что для регулирования фазы пиковой кривой вторичного напряжения θ_m в пределах от 0 до 90° нужно, чтобы поток $\Phi_р$ через регулировочную обмотку и ее э. д. с. $E_р$ при холостом ходе составляли приблизительно 0,6 ÷ 0,7 соответствующих значений первичной цепи, т. е.

$$\Phi_р=(0{,}6\div 0{,}7)\cdot\Phi_1;$$
$$E_р=(0{,}6\div 0{,}7)\cdot U_1.$$

В этом случае для обеспечения возможности регулирования тока регулировочной обмотки в широких пределах с помощью добавочного сопротивления в ее цепь (рис. 27, *б* и 28, *б*), число витков этой обмотки можно принять равным числу витков первичной обмотки: $W_р=W_1$.

Максимальная амплитуда м. д. с. регулировочной обмотки $F_{рm}$ зависит от величины наибольшего сдвига фазы вторичного напряжения θ_m. При принятых соотношениях $\frac{\Phi_р}{\Phi_1}=\frac{E_р}{U_1}=0{,}6\div 0{,}7$ в табл. 10 дано отношение

этой м. д. с. к м. д. с. F_2, определяемой позицией 7а или 7б.

Таблица 10

θ_n в градусах	$\frac{F_{pm}}{F_2}$
30	0,9—1,0
50	1,1—1,3
70	1,4—1,6
90	1,7—1,8

Наибольший ток регулировочной обмотки

$$I_{pm}=\frac{F_{pm}}{\sqrt{2}\,W_p} \qquad [a].$$

Предварительное значение поперечного сечения провода регулировочной обмотки

$$q'_p=\frac{I_{pm}}{j_{pm}} \qquad [мм^2],$$

где $j_{pm}=2,5\div3,0$ $a/мм^2$ — наибольшая плотность тока в проводе регулировочной обмотки.

Окончательные значения сечения и диаметра этого провода выбираются по ближайшим данным ГОСТ из Приложения I:

$$q_p=\ldots\ [мм^2]; \quad d_p/d_{ри}=\ldots\ [мм].$$

При размещении регулировочной обмотки на главных стержнях сердечника следует учесть замечания, указанные в позиции 7 при размещении первичной обмотки.

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 27, *б*).

Принимая радиальную толщину регулировочной обмотки приблизительно равной толщине первичной δ_1, получим следующее число слоев регулировочной обмотки на стержне:

$$m_p=\frac{\delta_1}{d_{ри}}$$

с округлением до ближайшего целого числа.

Число витков регулировочной обмотки в одном слое

$$n_p=\frac{W_p}{2m_p}.$$

Длина, занимаемая регулировочной обмоткой по высоте главного стержня,

$$l_р = n_р d_{ри} + 2\varepsilon_1,$$

где $\varepsilon_1 = 1{,}0 \div 2{,}0$ *мм* — толщина щеки каркаса регулировочной обмотки из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824—60, Приложение VII).

б) Трансформатор броневого типа (рис. 28, *б*).

Как и в предыдущем случае, можно записать:

$$m_р = \frac{\delta_1}{d_{ри}}; \quad n_р = \frac{W_р}{m_р}.$$

Длина, занимаемая регулировочной обмоткой по высоте стержня,

$$l_р = n_р d_{ри} + 2\varepsilon_1,$$

где $\varepsilon_1 = 1 \div 2$ *мм*, как и в случае трансформатора стержневого типа.

Сечение торца окна трансформатора, занимаемого регулировочной обмоткой (рис. 27, *б* и 28, *б*),

$$S'' = b_1 l_р,$$

где b_1 берется из позиции 5.

10. Определение размеров магнитных шунтов регулируемых трансформаторов

Как и в случае нерегулируемых трансформаторов, на основании картины потоков (рис. 27, *б* и 28, *б*) получаются следующие формулы для определения размеров магнитных шунтов.

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 27, *б*).

Общая сумма отношений поперечных сечений верхнего и нижнего магнитных шунтов к длинам воздушных зазоров между каждым из них и торцом окна трансформатора следующая:

$$\frac{S'_s}{\delta'_s k'_s} + \frac{S''_s}{\delta''_s k''_s} = \frac{1{,}6\,(\Phi_1 - \Phi_{20}) \cdot 10^8}{F_2} - \frac{2S'}{k_2 l_2} - \frac{2S''}{k'_2 c} - \frac{2S'''}{k'''\delta'''},$$

где k'_s, k''_s, k_2, k'_2 и k''' находят по кривой рис. 32, l_2 — из позиции 4, Φ_1 и Φ_{20} — из позиции 6, c — из позиции 7, F_2 — из позиции 7, *а*, δ'_s и S' — из позиции 8, S'' — из позиции 9; $S''' = a_1 b_{ут}$ — сечение воздушного зазора, *см*², параллельное боковой поверхности ярма

и плоскости сжимающей консоли из углового железа, которая размещается между катушками первичной и регулировочной обмоток для сжатия пакета сердечника трансформатора; $\delta''' \geqslant 0{,}75 l_2$ — длина одностороннего воздушного зазора между ярмом и плоскостью угольника, *см*; δ''_s — длина одностороннего воздушного зазора нижнего магнитного шунта, *см*; $\delta''_s = (0{,}05 \div 0{,}20) \cdot l_2$.

Задаваясь значениями δ'_s и δ''_s и определяя k'_s, k''_s, k_2, k'_2 и k''' по кривой рис. 32, можно вычислить поперечные сечения верхнего и нижнего магнитных шунтов S'_s и S''_s и толщины пакетов их b'_s и b''_s (рис. 27, *б*), принимая по конструктивным соображениям эти сечения одинаковыми.

б) Трансформатор броневого типа (рис. 28, *б*).

Общая сумма отношений поперечных сечений верхнего и нижнего магнитных шунтов к длинам воздушных зазоров их следующая:

$$\frac{S'_s}{\delta'_s k'_s} + \frac{S''_s}{\delta''_s k''_s} = \frac{0{,}8\,(\Phi_1 - 2\Phi_{20}) \cdot 10^8}{F_2} - \frac{2\,(S' + S'')}{k_2 l_2} - \frac{S'''}{k''' \delta'''},$$

где значения δ'_s, δ''_s, δ''', k'_s, k''_s, k''', S', S'', S''' и другие определяются, как и в предыдущем случае, а F_2 берется из позиции 7б.

После размещения первичной и регулировочных обмоток на главных стержнях сердечника трансформатора и определения размеров магнитных шунтов можно вычислить полную высоту окна сердечника:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 27, *б*)

$$H = l_1 + b''_s + l_\text{р} \quad [см];$$

б) для трансформатора броневого типа (рис. 28, *б*)

$$H = l_1 + b''_s + l_\text{р} + b'_s + b' \quad [см],$$

где l_1 берется из позиции 7, b'_s — из позиции 8 или 10, $l_\text{р}$ — из позиции 9, b''_s — из позиции 10, b' — согласно рис. 28, *б*.

11. Построение пиковой кривой вторичного напряжения во времени при холостом ходе

Графическое построение пиковой кривой вторичного напряжения во времени производится по кривой вторичного потока во времени, полученной с помощью

кривых намагничивания полной и вторичной магнитных цепей трансформатора. Для вычисления кривых намагничивания следует вычертить полный эскиз сердечника трансформатора (рис. 27 или 28). В целях удобства этого вычисления составляется табл. 11, в которой задаются индукциями во вторичном стержне B_2 при холостом ходе трансформатора и затем определяют все величины, указанные в таблице.

Далее строятся кривые намагничивания $\varphi_1 = f_1(F_1)$ и $\varphi_2 = f_2(F_1)$ в удобных масштабах, кривая во времени первичного потока $\varphi_1 = \Phi_1 \sin \omega t$, а с помощью последней и кривых намагничивания φ_1 и φ_2 — кривая $\varphi_2 = f(\omega t)$ (кривая 2′ на рис. 33). Так как вторичная э. д. с. $e_2 = -W_2 \frac{d\varphi_2}{dt}$ [*в*], то для получения ее необходимо произвести графическое дифференцирование кривой 2′. Это дифференцирование состоит в построении кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$ по ординатам, величина которых находится для разных точек искомой кривой с помощью касательных, проводимых к кривой 2′ (рис. 33). Если за единицу масштаба по оси абсцисс принять величину $\frac{OT}{\pi}$, где OT — период в миллиметрах кривой вторичного потока $\varphi_2 = f(\omega t)$, то масштаб ординат кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$ будет таким:

$$1\ мм = 2\pi f W_2 q_2' \quad [в],$$

при этом q_2' [*вб*] — масштаб ординат потока φ_2, f — частота [*гц*] питающей сети.

На рис. 33 выполнено графическое дифференцирование кривой 2′ для трансформатора, рассчитанного ниже в числовом примере. Точность графического дифференцирования определяется точностью проведения касательных к кривой 2′. Наиболее важной является касательная в точке прохождения кривой 2′ через нуль, так как она определяет высоту пика кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$. Для проведения ее рекомендуется следующий способ. Из точки O кривой 2′ (рис. 33), как из центра, проводится полуокружность радиусом 3—4 *мм* и на ней этим же радиусом, начиная от кривой, делаются две последовательные засечки. Из последних по обе стороны полуокружности делается еще по две засечки другим радиусом. Через них и центр полуокружности

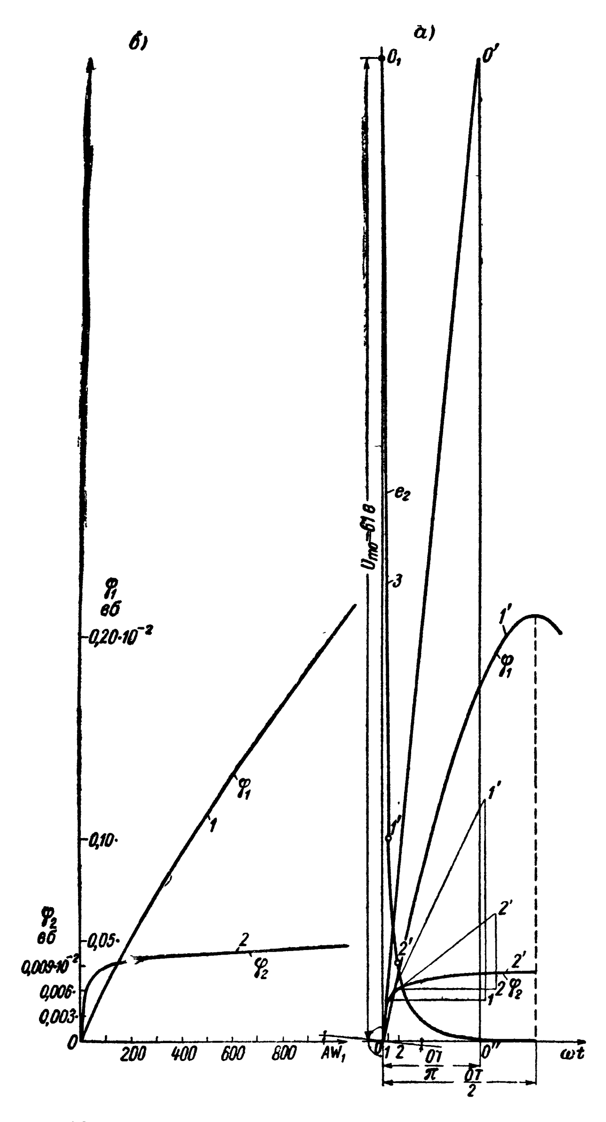


Рис. 33. Построение пиковой кривой вторичной э. д. с. трансформатора.

Таблица 11

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 27)	**б) Трансформатор броневого типа (рис. 28)**
B_2	B_2
$B'_2 = \frac{B_2}{2}\left(1 + \frac{b_2}{a_1}\right)$	$B'_2 = \frac{B_2}{2}\left(1 + \frac{b_2}{a_1}\right)$
$aw_{\text{ср}} = \frac{aw_2 + 4aw'_2}{6}$	$aw_{\text{ср}} = \frac{aw_2 + 4aw'_2}{6}$
$F_2 \approx aw_2 l_2 + aw_{\text{ср}} a_1 + 0{,}8 B_2 \delta_э \cdot 10^4$	$F_2 \approx aw_2 l_2 + aw_{\text{ср}} \frac{a_1}{2} + 0{,}8 B_2 \delta_э 10^4$
$B' = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}8 k_2 l_2}$	$B' = B'' = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}8 k_2 l_2}$
$B'_s = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}8 \cdot 2\delta'_s k'_s}$	$B'_s = \frac{F_2 10^{-4}}{0{,}8 \cdot 2\delta'_s k'_s}$
$B'' = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}8 k'_2 c}$	$B''_s = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}8 \cdot 2\delta''_s k''_s}$
$B''_s = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}8 \cdot 2\delta''_s k''_s}$	$B''' = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}8 \cdot 2\delta''' k'''}$
$B''' = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}8 \cdot 2\delta''' k'''}$	
$B_1 = \frac{B_2 S_2 + B' S' + B'_s S'_s}{S_1} + \frac{B'' S'' + B''_s S''_s + 2B''' S'''}{S_1}$	$B_1 = \frac{2(B_2 S_2 + B' S' + B'_s S'_s)}{S_1} + \frac{2(B'' S'' + B''_s S''_s + 2B''' S''')}{S_1}$
$F'_1 = aw_1 (2l_1 + l_3) + 1{,}6 B_1 \delta_э 10^4$	$F'_1 = aw_1 (2l_1 + l_3) + 1{,}6 B_1 \delta_э \cdot 10^4$
$F_1 = F'_1 + F_2$	$F_1 = F'_1 + F_2$
$\varphi_2 = B_2 S_2 \cdot 10^{-4}$	$2\varphi_2 = 2B_2 S_2 10^{-4}$
$\varphi_1 = B_1 S_1 \cdot 10^{-4}$	$\varphi_1 = B_1 S_1 \cdot 10^{-4}$
$i_1 = \frac{F_1}{W_1}$	$i_1 = \frac{F_1}{W_1}$

проводится прямая, являющаяся нормалью к кривой $2'$ в точке O. Перпендикуляр к этой нормали в точке O и представляет искомую касательную. Отложив из точки O по оси абсцисс единицу масштаба $OO'' = \frac{OT}{\pi}$ и проведя вертикаль через конец этого отрезка до пересечения ее с касательной, получают прямоугольный треугольник $OO'O''$, катет которого $O'O''$ представляет абсолютное значение высоты пика кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$. Эта ордината искомой кривой $O'O'' = OO_1$ откладывается соответственно абсциссе O исходной кривой $2'$ без учета знака производной в формуле для э. д. с. e_2.

Касательные к другим точкам кривой $2'$ проводятся аналогично, только вместо полуокружности из какой-нибудь точки кривой делаются на ней две засечки радиусом 2—3 *мм* и к полученному элементу кривой проводится нормаль. Перпендикуляр к нормали в данной точке кривой и будет представлять касательную. В каждой из этих точек кривой строятся прямоугольные треугольники $11'1''$, $22'2''$ и т. д., у которых горизонтальные катеты представляют отрезок $\frac{OT}{\pi}$, а вертикальные — абсолютные значения ординат искомой кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$. Последние и откладываются от оси абсцисс в виде отрезков $11'$, $22'$ и т. д., соответственно абсциссам 1,2 и т. д. кривой $2'$ (рис. 33). После соединения точек O_1, $1'$, $2'$ и т. д. получается искомая кривая 3 вторичной э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$, повернутая на 180° по отношению к истинному положению этой кривой во времени.

12. Средние длины витков обмоток трансформатора

Так как в пиковых трансформаторах поперечные сечения вторичных и первичных стержней выполняются прямоугольной формы, то при цилиндрических обмотках средние длины витков их можно представить следующим образом:

средняя длина витка вторичной обмотки

$$l_{w2} = 2(a_2 + b_2 + 4\varepsilon_0'' + 2\delta_2) \ [см];$$

средние длины витков первичной и регулировочной

обмоток

$$l_{w1} = l_{wp} = 2(a_1 + b_1 + 4\varepsilon_0' + 2\delta_1) \ [см],$$

где a_2 и b_2 берутся из позиции 2, δ_2 — из позиции 4, a_1 и b_1 — из позиции 5, δ_1 и ε_0' — из позиции 7, $\varepsilon_0'' = 0{,}5 \div 1{,}0$ *мм* — толщина изоляции между вторичной катушкой и стержнем, выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824—60, Приложение VII).

13. Масса меди и активные сопротивления обмоток

Масса меди вторичной обмотки

$$G_{к2} = 8{,}9 W_2' q_2 l_{w2} \cdot 10^{-5} \ [кг];$$

масса меди первичной обмотки

$$G_{к1} = 8{,}9 W_1 q_1 l_{w1} \cdot 10^{-5} \ [кг];$$

масса меди регулировочной обмотки

$$G_{к.р} = 8{,}9 W_р q_р l_{wр} \cdot 10^{-5} \ [кг];$$

общая масса меди обмоток

$$G_к = G_{к1} + G_{к2} + G_{к.р} \ [кг].$$

Активные сопротивления первичной, вторичной и регулировочной обмоток трансформатора при 75° С будут:

$$r_1 = 1{,}22 \frac{W_1 l_{w1}}{5700 q_1} \ [ом]; \quad r_2 = 1{,}22 \frac{W_2' l_{w2}}{5700 q_2} \ [ом];$$

$$r_р = 1{,}22 \frac{W_р l_{wр}}{5700 q_р} \ [ом],$$

где $W_2' = W_2$ для трансформатора стержневого типа (рис. 27), $W_2' = 2W_2$ для трансформатора броневого типа (рис. 28), W_2 берется из позиции 3 главы пятой, q_2 — из позиции 4, W_1 — из позиции 6, q_1 — из позиции 7, $W_р$ и $q_р$ — из позиции 9, l_{w1}, l_{w2}, $l_{wр}$ — из позиции 12.

14. Потери в обмотках при 75° С

Потери в первичной, вторичной, регулировочной обмотках и общие потери в трансформаторе:

$$P_{к1} = I_1^2 r_1 \ [вт]; \quad P_{к2} = I_2^2 r_2 \ [вт]; \quad P_{кр} = I_{рm}^2 r_р \ [вт];$$

$$P_к = P_{к1} + P_{к2} + P_{кр} \ [вт],$$

где l_2 равно заданному, l_1 берется из позиции 7 с последующим уточнением в позиции 17, l_{pm} — из позиции 9, r_1, r_2 и r_p — из позиции 13.

15. Масса материала сердечника трансформатора

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 27).

Масса материала вторичного стержня

$$G_{c2} = \gamma_c S_2 l_2 \cdot 10^{-3} \ [кг],$$

где γ_c — удельная масса материала; для стали $\gamma_c = 7{,}6$ *г/см³*, для пермаллоя $\gamma_c = 8{,}5$ *г/см³*;

масса стали первичных стержней

$$G_{c1} = 2 \cdot 7{,}6 (l_1 + l_p + b''_s) S_1 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 7{,}6 (b'_s + b' + a_2) \times S'_1 \cdot 10^{-3} \ [кг];$$

масса стали ярма

$$G_{c.я} = 7{,}6 S_1 l_3 \cdot 10^{-3} \ [кг];$$

масса стали магнитных шунтов

$$G'_{cs} = 7{,}6 S'_s (l_2 - 2\delta'_s) \cdot 10^{-3} \ [кг];$$

$$G''_{cs} = 7{,}6 S''_s (c - 2\delta''_s) \cdot 10^{-3} \ [кг].$$

б) Трансформатор броневого типа (рис. 28).

Масса материала вторичных стержней

$$G_{c2} = 2\gamma_c S_2 l_2 \cdot 10^{-3} \ [кг];$$

масса стали первичного стержня

$$G_{c1} = 7{,}6 (l_1 + l_p + b''_s + b'_s + b' + a_2) S_1 \cdot 10^{-3} \ [кг];$$

масса стали ярем

$$G_{c.я} = 7{,}6 (l_1 + l_p + b''_s + b'_s + b' + a_2) S_1 \cdot 10^{-3} + 7{,}6 l_3 S_1 \cdot 10^{-3} \ [кг];$$

масса стали магнитных шунтов

$$G'_{cs} = 2 \cdot 7{,}6 \cdot S'_s (l_2 - 2\delta'_s) \cdot 10^{-3} \ [кг];$$

$$G''_{cs} = 2 \cdot 7{,}6 \cdot S''_s (l_2 - 2\delta''_s) \cdot 10^{-3} \ [кг];$$

общая масса материала сердечника трансформатора

$$G_c = G_{c1} + G_{c2} + G_{c.я} + G'_{cs} + G''_{cs} \ [кг],$$

где $S'_1 = k_3 b_1 (l_3 - c)$ [$см^2$]; S_2 и a_2 берутся из позиции 2, l_2 — из позиции 4, S_1, b_1 и k_3 — из позиции 5, l_1 и c — из позиции 7, S'_s, δ'_s и b'_s — из позиции 8 или 10, l_p — из позиции 9, S''_s, δ''_s и b''_s — из позиции 10, b' и l_3 — согласно рис. 27 или 28.

16. Магнитные потери в сердечнике

а) Трансформатор стержневого типа (рис. 27).

Потери в стали вторичного стержня

$$P_{c2} = k_c B_2^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot G_{c2} \ [вт];$$

магнитные потери в части первичных стержней, охватываемой первичной обмоткой, и ярме

$$P'_{c1} = k_c B_1^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot (G'_{c1} + G_{c.я}) \ [вт];$$

магнитные потери в остальной части первичных стержней

$$P''_{c1} \approx k_c (B'_1)^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot G''_{c1} \ [вт];$$

магнитные потери в магнитных шунтах

$$P'_{cs} = k_c B_s'^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot G'_{cs} \ [вт];$$

$$P''_{cs} = k_c (B''_s)^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot G''_{cs} \ [вт],$$

где $G'_{c1} = 2 \cdot 7{,}6 S_1 l_1 \cdot 10^{-3}$ [$кг$]; $G''_{c1} = G_{c1} - G'_{c1}$ [$кг$]; $B'_1 \approx \approx \frac{B_1}{2}$ [$тл$].

б) Трансформатор броневого типа (рис. 28).

Магнитные потери во вторичных стержнях

$$P_{c2} = k_c B_2^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot G_{c2} \ [вт];$$

магнитные потери в части первичного стержня, охватываемой первичной обмоткой, и части ярем

$$P'_{c1} = k_c B_1^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot (G'_{c1} + G'_{c.я}) \ [вт];$$

магнитные потери в остальной части первичного стержня и ярем

$$P''_{c1} \approx k_c (B'_1)^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot (G''_{c1} + G''_{c.я}) \ [вт],$$

где $G'_{c1} = 7{,}6 S_1 l_1 \cdot 10^{-3}$ [*кг*]; $G'_{с.я} = 7{,}6 S_1 (l_1 + l_3) \cdot 10^{-3}$ [*кг*]; $G''_{c1} = G_{c1} - G'_{c1}$ [*кг*]; $G''_{с.я} = G_{с.я} - G'_{с.я}$ [*кг*]; $B'_1 \approx \frac{B_1}{2}$ [*тл*].

Магнитные потери в магнитных шунтах определяются, как и в случае трансформатора стержневого типа, с учетом массы стали шунтов по позиции 15, *б*.

Общие магнитные потери в сердечнике трансформатора

$$P_с = P_{с.я} + P'_{c1} + P''_{c1} + P'_{cs} + P''_{cs} \text{ [вт]},$$

где $B'_s \approx \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}8 \cdot 2\delta'_s k'_s}$ [*тл*]; $B''_s \approx \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}8 \cdot 2\delta''_s k''_s}$ [*тл*]; частота f задана, B_2 берется из позиции 2, B_1 и S_1 — из позиции 5, F_2 и l_1 — из позиции 7, δ'_s и k'_s — из позиции 8 или 10, δ''_s и k''_s — из позиции 10, G_{c1}, G_{c2}, $G_{с.я}$, G'_{cs} и G''_{cs} — из позиции 15, l_3 — согласно рис. 27 или 28.

Удельные магнитные потери в стали $k_с$ при $B = 1{,}0$ *тл* и $f = 50$ *гц* в зависимости от марки стали при толщине листа 0,35 *мм* по ГОСТу 802—58 имеют следующие значения: для марки стали Э41 $k_с = 1{,}35$ *вт/кг*; для марки стали Э42 $k_с = 1{,}20$ *вт/кг*.

17. Определение тока холостого хода трансформатора

В пиковых трансформаторах ток холостого хода практически является рабочим током первичной цепи, потому что он почти не изменяется при изменении нагрузки вторичной обмотки от нуля до полной. Ток холостого хода пикового трансформатора определяется величиной магнитных потерь в сердечнике $P_с$ и значением намагничивающей м. д. с. первичной обмотки $F_1 = F'_1 + F_2$. Величина м. д. с. F_1 берется из табл. 11 при номинальном значении индукции B_2 во вторичном стержне, принятой в позиции 2. При этом условии ток холостого хода, или первичный ток трансформатора определится следующим образом:

активная составляющая тока

$$I_{0a} = \frac{P_с}{U_1} \text{ [a]};$$

реактивная составляющая тока

$$I_{0r} = \frac{F_1}{\sqrt{2} W_1} \text{ [a]};$$

ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \ [a],$$

где первичное напряжение U_1 задано, W_1 берется из позиции 6, P_c — из позиции 16, F_1 — из табл. 11.

18. Проверка трансформатора на нагревание

Потери в пиковом трансформаторе сосредоточены в основном в первичной и регулировочной обмотках и в стали сердечника. Ввиду достаточного теплообмена между обмотками и сердечником, превышение их температуры над температурой окружающей среды без большой погрешности можно определить по формуле

$$\theta \approx \frac{P_{к1} + P_{к.р} + P_c}{\alpha_0 (S_{сер} + S_{обм})} + \Delta\theta^\circ \ [^\circ C],$$

где $P_{к1}$ и $P_{к.р}$ — потери в первичной и регулировочной обмотках в ваттах из позиции 14, P_c — магнитные потери в сердечнике в ваттах из позиции 16;

$\alpha_0 = (13 \div 15) \cdot 10^{-4}$ — средний коэффициент теплоотдачи открытой поверхности обмоток и сердечника, *вт/см² град*;

$\Delta\theta^\circ$ — перепад температуры от внутренних слоев обмоток к наружным, который для пропитанных лаком обмоток может быть приближенно принят равным 10—15° С;

$S_{сер}$ и $S_{обм}$ — открытые поверхности сердечника и обмоток трансформатора, *см²*.

Величины открытых поверхностей сердечника и обмоток пикового трансформатора могут быть определены по следующим формулам:

а) для трансформатора стержневого типа (рис. 27)

$$S_{сер} \approx 2 (a_1 + b_s'' + b_s' + b' + a_2 + l_3) b_1 - l_2 b_1 \ [см^2];$$

$$S_{обм} \approx 4 (a_1 + b_1 + 4\varepsilon_0' + 4\delta_1)(l_1 + l_p) \ [см^2];$$

б) для трансформатора броневого типа (рис. 28)

$$S_{сер} \approx 2 \left(\frac{a_1}{2} + l_1 + b_s'' + l_p + b_s' + b' + a_2 + 2l_3\right) \times$$

$$\times b_1 - 2l_2 b_1 \ [см^2];$$

$$S_{обм} \approx 2 (a_1 + b_1 + 4\varepsilon_0' + 4\delta_1)(l_1 + l_p) \ [см^2],$$

где a_2 берется из позиции 2, l_2 — из позиции 4, a_1 и b_1 — из позиции 5, ε_0', δ_1 и l_1 — из позиции 7, l_p — из позиции 9, b_s' и b_s'' — из позиции 10, b' и l_3 — согласно рис. 27 или 28.

III. ПРИМЕР РАСЧЕТА РЕГУЛИРУЕМОГО ПИКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Задание

Первичное напряжение $U_1 = 120$ *в*.

Амплитуда вторичного пикового напряжения при нагрузке $U_m = 50$ *в*.

Действующее значение вторичного тока нагрузки $I_2 = 0{,}10$ *а*.

Средняя скорость изменения вторичного напряжения при нагрузке $\xi = 15$ *в/град*.

Частота питающей сети $f = 50$ *гц*.

Наибольший сдвиг фазы вторичного напряжения $\theta_m = 70°$.

Произведение коэффициентов формы кривой и амплитуды вторичного пикового напряжения при выполнении вторичного стержня из электротехнической стали марки Э42 толщиной листа 0,35 *мм* (ГОСТ 802—58, Приложение V) по формуле (28) будет равно:

$$k_0 = k_a k_f = \frac{180\xi}{1{,}5U_m + 90\beta\xi} = \frac{180 \cdot 15}{1{,}5 \cdot 50 + 90 \cdot 0{,}05 \cdot 15} = 18{,}9,$$

где по формуле (22а)

$$\beta = \frac{1{,}5}{15 + \xi} = \frac{1{,}5}{15 + 15} = 0{,}05.$$

1. Тип пикового трансформатора

Выбираем сердечник стержневого типа (рис. 27, *б*). Материал сердечника — листовая электротехническая сталь марки Э42 толщиной листа 0,35 *мм* (ГОСТ 802—58, Приложение V).

2. Поперечное сечение вторичного стержня трансформатора

$$S_2 = 5{,}4\sqrt{\frac{U_m I_2 \alpha}{k_0 f j_2 B_2}} = 5{,}4\sqrt{\frac{50 \cdot 0{,}1 \cdot 4{,}2}{18{,}9 \cdot 50 \cdot 2{,}2 \cdot 1{,}95}} = 0{,}40\ см^2,$$

где принято, что $\alpha = 4{,}2$; $j_2 = 2{,}2$ *а/мм²*; $B_2 = 1{,}95$ *тл*.

Размеры поперечного сечения

$$a_2 = \sqrt{\frac{S_2}{k_3\zeta}} = \sqrt{\frac{0{,}40}{0{,}9 \cdot 3{,}6}} = 0{,}35 \text{ см};$$

$$b_2 = \zeta a_2 = 3{,}6 \cdot 0{,}35 = 1{,}3 \text{ см},$$

где принято, что $k_3 = 0{,}9$; $\zeta = 3{,}6$.

3. Число витков вторичной обмотки

$$W_2 = \frac{U_m}{4k_0 f \Phi_2} = \frac{50}{4 \cdot 18{,}9 \cdot 50 \cdot 0{,}78 \cdot 10^{-4}} \approx 170,$$

где $\Phi_2 = B_2 S_2 \cdot 10^{-4} = 1{,}95 \cdot 0{,}40 \cdot 10^{-4} = 0{,}78 \cdot 10^{-4}$ *вб*.

4. Сечение и диаметр провода вторичной обмотки и длина вторичного стержня

Предварительное значение поперечного сечения провода вторичной обмотки

$$q_2' = \frac{I_2}{j_2} = \frac{0{,}10}{2{,}2} = 0{,}0455 \text{ мм}^2.$$

Окончательно по ГОСТу 7262—54 из Приложения I принимаем $q_2 = 0{,}0440$ *мм²*; $d_2/d_{2и} = 0{,}25/0{,}30$ *мм*; марка провода ПЭВ-2.

Число витков в слое катушки

$$n_2 = \sqrt{\zeta' W_2} = \sqrt{2{,}3 \cdot 170} = 20;$$

число слоев

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2} = \frac{170}{20} \approx 9,$$

где принято, что $\zeta' = 2{,}3$.

Длина вторичного стержня, занимаемая обмоткой (рис. 31)

$$l_2' = n_2 d_{2и} = 20 \cdot 0{,}03 = 0{,}6 \text{ см};$$

полная длина вторичного стержня

$$l_2 = l_2' + 2\varepsilon_2 = 0{,}6 + 2 \cdot 0{,}15 = 0{,}9 \text{ см},$$

где толщина щеки каркаса $\varepsilon_2 = 1{,}5$ *мм*; каркас изготовлен из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824—60, Приложение VII).

Толщина вторичной обмотки

$$\delta_2 = m_2 d_{2и} = 9 \cdot 0{,}03 = 0{,}27 \text{ см}.$$

5. Поперечное сечение главного стержня

Амплитуда и средняя скорость нарастания вторичного пикового напряжения при холостом ходе

$$U_{m0}=\mu U_m=1{,}2\cdot 50=60\ \textit{в};\ \xi_0=$$
$$=\frac{\mu}{\eta}\xi=\frac{1{,}2}{0{,}9}\cdot 15=20\ \textit{в/град};$$

амплитуда вторичного потока при холостом ходе

$$\Phi_{20}=\Phi_2\mu\frac{k_0}{k_0'}=0{,}78\cdot 10^{-4}\cdot 1{,}2\cdot\frac{18{,}9}{21{,}6}=0{,}82\cdot 10^{-4}\ \textit{вб},$$

где по формуле (28) $k_0'=21{,}6$ при $\xi_0=20$ *в/град*;

амплитуда первичного потока по позиции 5а

$$\Phi_1=\frac{\Phi_{20}}{\sin\frac{(1-\gamma)U_{m0}}{\xi_0}}=\frac{0{,}82\cdot 10^{-4}}{\sin\frac{(1-0{,}26)\cdot 60}{20}}=21\cdot 10^{-4}\ \textit{вб},$$

где по формуле (22а)

$$\gamma=\frac{13}{30+\xi_0}=\frac{13}{30+20}=0{,}26.$$

Поперечное сечение главного стержня

$$S_1=\frac{\Phi_1\cdot 10^4}{B_1}=\frac{21\cdot 10^{-4}\cdot 10^4}{1{,}15}=18{,}3\ \textit{см}^2,$$

где принято, что $B_1=1{,}15$ *тл*.

Размеры сечения главного стержня

$$a_1=b_1=\sqrt{\frac{S_1}{k_3}}=\sqrt{\frac{18{,}3}{0{,}9}}\approx 4{,}5\ \textit{см}.$$

6. Число витков первичной обмотки

$$W_1=\frac{U_1}{4{,}44f\Phi_1}=\frac{120}{4{,}44\cdot 50\cdot 21\cdot 10^{-4}}\approx 260.$$

7. Сечение и диаметр провода первичной обмотки и размещение ее на главных стержнях

М. д. с. при холостом ходе, соответствующая участку вторичной магнитной цепи,

$$F_2\approx aw_2l_2+aw_{\text{ср}}a_1+0{,}8B_{20}\delta_э\cdot 10^4=$$
$$=480\cdot 0{,}9+89\cdot 4{,}5+0{,}8\cdot 2{,}05\cdot 0{,}0035\cdot 10^4=890,$$

где

$$B_{20} = \frac{\Phi_{20} \cdot 10^4}{S_2} = \frac{0{,}82 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4}{0{,}40} = 2{,}05 \text{ тл};$$

$$B_{20} = \frac{B_{20}}{2}\left(1 + \frac{b_2}{a_1}\right) = \frac{2{,}05}{2}\left(1 + \frac{1{,}3}{4{,}5}\right) = 1{,}32 \text{ тл};$$

по кривым намагничивания рисунка 42 для стали марки Э42

$$aw_2 = 480;\ aw_2' = 13;\ aw_{\text{ср}} \approx \frac{aw_2 + 4aw_2'}{6} = \frac{480 + 4 \cdot 13}{6} \approx 89;$$

принято $\delta_э = 0{,}0035$ *см*.

Действующее значение первичного тока

$$I_1 \approx \frac{(1{,}1 \div 1{,}3)\, F_2}{\sqrt{2}\, W_1} = \frac{1{,}2 \cdot 890}{\sqrt{2} \cdot 260} \approx 2{,}8 \text{ а}.$$

Предварительное значение поперечного сечения провода первичной обмотки

$$q_1' = \frac{I_1}{j_1'} = \frac{2{,}8}{2{,}0} = 1{,}4 \text{ мм}^2,$$

где принято, что $j_1' = 2{,}0$ *а/мм²*.

Окончательно по ГОСТу 6324—52 из Приложения I принимаем:
$q_1 = 1{,}43$ *мм²*; $d_1/d_{1и} = 1{,}35/1{,}62$ *мм*; марка провода ПБД.

Длина, занимаемая первичной обмоткой по высоте главного стержня,

$$l_1 \approx (1{,}2 \div 1{,}6)\, a_1 = 1{,}2 \cdot 4{,}5 = 5{,}4 \text{ см}.$$

Число витков первичной обмотки в одном слое

$$n_1 = \frac{l_1 - 2\varepsilon_1}{d_{1и}} = \frac{5{,}4 - 2 \cdot 0{,}2}{0{,}162} \approx 30,$$

где толщина щеки каркаса $\varepsilon_1 = 2$ *мм*; каркас изготовлен из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824—60, Приложение VII).

Число слоев первичной обмотки на стержне

$$m_1 = \frac{W_1}{2n_1} = \frac{260}{2 \cdot 30} \approx 5.$$

Толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = m_1 d_{1и} = 5 \cdot 0{,}162 \approx 0{,}81 \text{ см}.$$

Ширина окна сердечника трансформатора в месте размещения первичной обмотки

$$c = 2(\varepsilon_0' + \delta_1) + \varepsilon_3 = 2(0,15 + 0,81) + 0,4 \approx 2,3 \text{ см},$$

где принято, что $\varepsilon_3 = 4$ *мм*; $\varepsilon_0' = 1,5$ *мм*.

8. Число витков регулировочной обмотки

Примем амплитуду потока регулировочной обмотки равной

$$\Phi_p = (0,6 \div 0,7)\,\Phi_1 = 0,7 \cdot 21 \cdot 10^{-4} = 14,7 \cdot 10^{-4} \text{ вб},$$

тогда число витков этой обмотки будет $W_p = W_1 = 260$.

9. Сечение и диаметр провода регулировочной обмотки и размещение ее на главных стержнях

По табл. 10 для $\theta_m = 70°$ примем

$$F_{pm} = 1,4 \cdot F_2 = 1,4 \cdot 890 = 1240.$$

Наибольший ток регулировочной обмотки

$$I_{pm} = \frac{F_{pm}}{\sqrt{2}\,W_p} = \frac{1240}{\sqrt{2} \cdot 260} = 3,38 \text{ а}.$$

Предварительное значение поперечного сечения провода регулировочной обмотки

$$q_p' = \frac{I_{pm}}{j_{pm}'} = \frac{3,38}{2,8} = 1,2 \text{ мм}^2,$$

где принято, что $j_{pm}' = 2,8$ *а/мм*².

Окончательно по ГОСТу 2773—51 из Приложения I принимаем: $q_p = 1,21$ *мм*²; $d_p/d_{pи} = 1,25/1,33$ *мм*; марка провода ПЭЛ.

Число слоев регулировочной обмотки на стержне

$$m_p \approx \frac{\delta_1}{d_{pи}} = \frac{0,81}{0,133} = 6.$$

Число витков регулировочной обмотки в одном слое

$$n_p = \frac{W_p}{2m_p} = \frac{260}{2 \cdot 6} = 23.$$

Длина, занимаемая регулировочной обмоткой по высоте главного стержня,

$$l_p = n_p d_{pи} + 2\varepsilon_1 = 23 \cdot 0,133 + 2 \cdot 0,15 = 3,3 \text{ см},$$

где толщина щеки каркаса $\varepsilon_1 = 1{,}5$ *мм*; каркас изготовлен из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824—60, Приложение VII).

Сечение торца окна трансформатора, занимаемого регулировочной обмоткой,

$$S'' = b_1 l_p = 4{,}5 \cdot 3{,}3 = 15{,}0 \text{ см}^2.$$

10. Размеры магнитных шунтов

Общая сумма отношений поперечных сечений верхнего и нижнего магнитных шунтов к длинам воздушных зазоров между каждым из них и торцом окна трансформатора:

$$\frac{S'_s}{\delta'_s k'_s} + \frac{S''_s}{\delta''_s k''_s} = \frac{1{,}6\,(\Phi_1 - \Phi_{20}) \cdot 10^8}{F_2} - \frac{2S'}{k_2 l_2} - \frac{2S''}{k'_2 c} - \frac{2S'''}{k'''\delta'''} =$$

$$= \frac{1{,}6\,(21 \cdot 10^{-4} - 0{,}82 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^8}{890} - \frac{2 \cdot 5{,}3}{0{,}93 \cdot 0{,}9} - \frac{2 \cdot 15}{0{,}85 \cdot 2{,}3} -$$

$$- \frac{2 \cdot 9}{0{,}95 \cdot 0{,}7} \approx 305 \text{ см},$$

где

$$S' = b_1 b' + (b_1 - b_2)\,a_2 =$$

$$= 4{,}5 \cdot 0{,}9 + (4{,}5 - 1{,}3) \cdot 0{,}35 = 5{,}3 \text{ см}^2;$$

$$b' = 0{,}9 \text{ см (рис. 27, } б); \quad S''' = a_1 b_{\text{уг}} = 4{,}5 \cdot 2 = 9 \text{ см}^2;$$

по кривой рис. 32 $k_2 = 0{,}93$ при $l_2 = 0{,}9$ *см*; $k'_2 = 0{,}85$ при $c = 2{,}3$ *см*; $k''' = 0{,}95$ при $\delta''' \approx 0{,}8 l_2 = 0{,}8 \cdot 0{,}9 \approx 0{,}7$ *см*. Положим

$$\delta'_s = (0{,}02 \div 0{,}10) \cdot l_2 = 0{,}045 \cdot 0{,}9 \approx 0{,}04 \text{ см}; \quad k'_s \approx 1;$$

$$\delta''_s = (0{,}05 \div 0{,}20) \cdot l_2 = 0{,}11 \cdot 0{,}9 \approx 0{,}10 \text{ см}; \quad k''_s \approx 0{,}99.$$

Далее, по конструктивным соображениям примем поперечные сечения верхнего и нижнего шунтов одинаковыми, т. е. положим $S'_s = S''_s$, тогда

$$S'_s \left(\frac{1}{\delta'_s k'_s} + \frac{1}{\delta''_s k''_s}\right) = 305;$$

$$S'_s \left(\frac{1}{0{,}04 \cdot 1} + \frac{1}{0{,}1 \cdot 0{,}99}\right) = 35{,}1 \cdot S'_s = 305,$$

откуда

$$S'_s = S''_s = \frac{305}{35{,}1} = 8{,}7 \text{ см}^2.$$

Толщина пакетов шунтов (рис. 27, *б*) будет

$$b'_s = b''_s = \frac{S''_s}{k_3 b_1} = \frac{8{,}7}{0{,}9 \cdot 4{,}5} \approx 2{,}1 \text{ см}.$$

Полная высота окна сердечника трансформатора, занимаемая первичной и регулировочной обмотками и нижним шунтом,

$$H = l_1 + b''_s + l_р = 5{,}4 + 2{,}1 + 3{,}3 = 10{,}8 \ см.$$

Полная высота сердечника трансформатора

$$H' = H + b'_s + b' + a_2 = 10{,}8 + 2{,}1 + 0{,}9 + 0{,}35 = 14{,}2 \ см.$$

Длина ярма трансформатора

$$l_3 = c + 2a_1 = 2{,}3 + 2 \cdot 4{,}5 = 11{,}3 \ см.$$

11. Построение пиковой кривой вторичного напряжения во времени при холостом ходе

Для графического построения пиковой кривой вторичного напряжения во времени в табл. 12 дан расчет кривых намагничивания $\varphi_1 = f_1(F_1)$ и $\varphi_2 = f_2(F_1)$, построенных в удобных масштабах на рис. 33. На этом же рисунке построена кривая во времени первичного потока $\varphi_1 = \Phi_1 \sin \omega t$, а с помощью последней и кривых намагничивания φ_1 и φ_2 — кривая $\varphi_2 = f(\omega t)$ (кривая 2' на рис. 33). Далее производится графическое дифференцирование кривой описанным выше способом, в результате которого получается искомая кривая 3 вторичной э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$ без учета знака производной.

Масштаб ординат кривой э. д. с. $e_2 = f(\omega t)$ следующий: 1 *мм* $= 2\pi f W_2 q'_2 = 2\pi \cdot 50 \cdot 170 \cdot 0{,}0006 \cdot 10^{-2} = 0{,}321$ *в*;

B_2 [*тл*]	$B'_2 = 0{,}64B_2$ [*тл*]	$aw_{ср} = \frac{aw_2 + 4aw_2}{6}$	$F_2 = 0{,}9aw_2 + 4{,}5aw_{ср} + 0{,}0023B_2 10^4$	$B' = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}67}$ [*тл*]	$B'_s = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}064}$ [*тл*]	$B'' = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{1{,}56}$ [*тл*]	$B''_s = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}158}$ [*тл*]	$B''' = \frac{F_2 \cdot 10^{-4}}{0{,}85}$ [*тл*]
0,515	0,33	0,4	16	0,0024	0,025	0,0010	0,010	0,0019
1,025	0,66	1,2	37	0,0055	0,0578	0,0024	0,0234	0,0043
1,535	0,99	9	123	0,0184	0,192	0,0079	0,078	0,0141
1,80	1,16	38	410	0,0612	0,640	0,0263	0,260	0,0482
2,05	1,32	80	890	0,1330	1,39	0,0570	0,563	0,1045
2,10	1,35	98	976	0,1455	1,525	0,0625	0,618	0,1150

амплитуда э. д. с. при холостом ходе $U_{m0} = 0{,}321 \times \times 190$ *мм* ≈ 61 *в*.

12. Средние длины витков обмоток трансформатора

Средняя длина витка вторичной обмотки

$$l_{w2} = 2\,(a_2 + b_2 + 4\varepsilon_0'' + 2\delta_2) = 2 \cdot (0{,}35 + 1{,}3 + 4 \cdot 0{,}1 + 2 \cdot 0{,}27) = 5{,}2 \text{ см}.$$

Средние длины витков первичной и регулировочной обмоток

$$l_{w1} = l_{wp} = 2\,(a_1 + b_1 + 4\varepsilon_0' + 2\delta_1) = 2\,(4{,}5 + 4{,}5 + 4 \cdot 0{,}15 + 2 \cdot 0{,}81) = 22{,}4 \text{ см},$$

где $\varepsilon_0' = 1{,}5$ *мм*; $\varepsilon_0'' = 1{,}0$ *мм*; изоляция выполнена из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824—60, Приложение VII).

13. Масса меди и активные сопротивления обмоток

Масса меди вторичной обмотки

$$G_{к2} = 8{,}9 \cdot W_2' q_2 l_{w2} \cdot 10^{-5} = 8{,}9 \cdot 170 \times 0{,}044 \cdot 5{,}2 \cdot 10^{-5} = 0{,}0035 \text{ кг};$$

масса меди первичной обмотки

$$G_{к1} = 8{,}9 \cdot W_1 q_1 l_{w1} \cdot 10^{-5} = 8{,}9 \cdot 260 \times 1{,}43 \cdot 22{,}4 \cdot 10^{-5} = 0{,}770 \text{ кг};$$

масса меди регулировочной обмотки

$$G_{к.р} = 8{,}9 \cdot W_p q_p l_{wp} \cdot 10^{-5} = 8{,}9 \cdot 260 \times 1{,}21 \cdot 22{,}4 \cdot 10^{-5} = 0{,}650 \text{ кг};$$

Таблица 12

$B_2 = \frac{0{,}4B_2 + 5{,}3B' + 8{,}7B_s'}{18{,}3} + \frac{15B'' + 8{,}7B_s'' + 18B'''}{18{,}3}$ [*тл*]	$F_1' = 22{,}1aw_1 + 0{,}0056B_1 \cdot 10^4$	$F_1 = F_1' + F_2$	$\varphi_2 = 0{,}4B_2 \cdot 10^{-4}$ [*вб*]	$\varphi_1 = 18{,}3B_1 \cdot 10^{-4}$ [*вб*]	$i_1 = \frac{F_1}{260}$
0,031	4	20	$0{,}20 \cdot 10^{-4}$	$0{,}565 \cdot 10^{-4}$	0,074
0,068	8	45	$0{,}40 \cdot 10^{-4}$	$1{,}24 \cdot 10^{-4}$	0,167
0,185	14	137	$0{,}61 \cdot 10^{-4}$	$3{,}38 \cdot 10^{-4}$	0,507
0,546	48	458	$0{,}72 \cdot 10^{-4}$	$10{,}0 \cdot 10^{-4}$	1,70
1,140	157	1047	$0{,}82 \cdot 10^{-4}$	$20{,}9 \cdot 10^{-4}$	3,90
1,250	231	1207	$0{,}84 \cdot 10^{-4}$	$22{,}8 \cdot 10^{-4}$	4,45

общая масса меди обмоток

$$G_к = G_{к1} + G_{к2} + G_{к.р} = 0{,}770 + 0{,}0035 + 0{,}650 \approx 1{,}423 \textit{ кг}.$$

Активные сопротивления обмоток трансформатора при 75°С следующие:

$$r_1 = 1{,}22 \cdot \frac{W_1 l_{w1}}{5700 \cdot q_1} = 1{,}22 \cdot \frac{260 \cdot 22{,}4}{5700 \cdot 1{,}43} = 0{,}905 \textit{ ом};$$

$$r_2 = 1{,}22 \cdot \frac{W_2' l_{w2}}{5700 \cdot q_2} = 1{,}22 \cdot \frac{170 \cdot 5{,}2}{5700 \cdot 0{,}044} = 4{,}3 \textit{ ом};$$

$$r_р = 1{,}22 \cdot \frac{W_р l_{wр}}{5700 \cdot q_р} = 1{,}22 \cdot \frac{260 \cdot 22{,}4}{5700 \cdot 1{,}21} = 1{,}07 \textit{ ом}.$$

14. Потери в обмотках при 75° С

$$P_{к1} = I_1^2 r_1 = 2{,}8^2 \cdot 0{,}905 \approx 7{,}1 \textit{ вт};$$
$$P_{к2} = I_2^2 r_2 = 0{,}10^2 \cdot 4{,}3 = 0{,}043 \textit{ вт};$$
$$P_{к.р} = I_{рm}^2 r_р = 3{,}38^2 \cdot 1{,}07 = 11{,}4 \textit{ вт}.$$

15. Масса стали сердечника трансформатора

Масса стали вторичного стержня

$$G_{с2} = 7{,}6 \cdot S_2 \cdot l_2 \cdot 10^{-3} = 7{,}6 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}9 \cdot 10^{-3} = 0{,}0028 \textit{ кг};$$

масса стали первичных стержней

$$G_{с1} = 2 \cdot 7{,}6\,(l_1 + l_р + b_s'')\, S_1 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 7{,}6\,(b_s' + b' + a_2) \times$$
$$\times S_1' \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 7{,}6\,(5{,}4 + 3{,}3 + 2{,}1) \cdot 18{,}3 \cdot 10^{-3} +$$
$$+ 2 \cdot 7{,}6\,(2{,}1 + 0{,}9 + 0{,}35) \cdot 36{,}5 \cdot 10^{-3} = 5{,}0 \textit{ кг},$$

где $S_1' = k_з b_1 (l_3 - c) = 0{,}9 \cdot 4{,}5\,(11{,}3 - 2{,}3) = 36{,}5 \textit{ см}^2$;
масса стали ярма

$$G_{с.я} = 7{,}6 \cdot S_1 \cdot l_3 \cdot 10^{-3} = 7{,}6 \cdot 18{,}3 \cdot 11{,}3 \cdot 10^{-3} = 1{,}6 \textit{ кг};$$

масса стали магнитных шунтов

$$G_{cs}' = 7{,}6\,(l_2 - 2\delta_s')\, S_s' \cdot 10^{-3} =$$
$$= 7{,}6\,(0{,}9 - 2 \cdot 0{,}04)\, 8{,}7 \cdot 10^{-3} = 0{,}056 \textit{ кг};$$
$$G_{cs}'' = 7{,}6\,(c - 2\delta_s'')\, S_s'' \cdot 10^{-3} =$$
$$= 7{,}6\,(2{,}3 - 2 \cdot 0{,}1)\, 8{,}7 \cdot 10^{-3} = 0{,}141 \textit{ кг};$$

общая масса стали сердечника трансформатора

$$G_с = G_{с1} + G_{с2} + G_{с.я} + G_{cs}' + G_{cs}'' = 5{,}0 + 0{,}0028 + 1{,}6 +$$
$$+ 0{,}056 + 0{,}141 = 6{,}8 \textit{ кг}.$$

16. Магнитные потери в сердечнике

Потери во вторичном стержне

$$P_{c2}=k_c B_2^2\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}\cdot G_{c2}=1,2\cdot 1,95^2\left(\frac{50}{50}\right)^{1,3}\cdot 0,0028=0,013\ вт;$$

магнитные потери в части первичных стержней, охватываемой первичной обмоткой, и ярме

$$P'_{c1}=k_c B_1^2\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}\cdot (G'_{c1}+G_{c.я})=$$
$$=1,2\cdot 1,15^2\cdot\left(\frac{50}{50}\right)^{1,3}\cdot(1,54+1,6)=5,0\ вт;$$

магнитные потери в остальной части первичных стержней

$$P''_{c1}=k_c (B'_1)^2\cdot\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}\cdot G''_{c1}=1,2\cdot 0,575^2\cdot\left(\frac{50}{50}\right)^{1,3}\times$$
$$\times 3,46\approx 1,4\ вт;$$

магнитные потери в магнитных шунтах

$$P'_{cs}=k_c (B'_s)^2\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}\cdot G'_{cs}=1,2\cdot 1,39^2\cdot\left(\frac{50}{50}\right)^{1,3}\times$$
$$\times 0,056=0,13\ вт;$$
$$P''_{cs}=k_c (B''_s)^2\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}\cdot G''_{cs}=1,2\cdot 0,563^2\left(\frac{50}{50}\right)^{1,3}\times$$
$$\times 0,141=0,052\ вт,$$

где

$$G'_{c1}=2\cdot 7,6\, S_1 l_1\cdot 10^{-3}=2\cdot 7,6\cdot 18,3\cdot 5,4\cdot 10^{-3}=1,54\ кг;$$
$$G''_{c1}=G_{c1}-G'_{c1}=5,0-1,54=3,46\ кг;$$
$$B'_1\approx\frac{B_1}{2}=\frac{1,15}{2}=0,575\ тл;$$
$$B'_s\approx\frac{F_2\cdot 10^{-4}}{1,6\delta'_s k'_s}=\frac{890\cdot 10^{-4}}{1,6\cdot 0,04\cdot 1}=1,39\ тл;$$
$$B''_s\approx\frac{F_2\cdot 10^{-4}}{1,6\delta''_s k''_s}=\frac{890\cdot 10^{-4}}{1,6\cdot 0,1\cdot 0,99}=0,563\ тл;$$

$k_c=1,2\ вт/кг$ для стали марки Э42;

общие магнитные потери в сердечнике трансформатора

$$P_c=P_{c2}+P'_{c1}+P''_{c1}+P'_{cs}+P''_{cs}=$$
$$=0,013+5,0+1,4+0,13+0,052\approx 6,6\ вт.$$

17. Ток холостого хода трансформатора

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{0a}=\frac{P_c}{U_1}=\frac{6,6}{120}=0,055\ a;$$

реактивная составляющая тока

$$I_{0r}=\frac{F_1}{\sqrt{2}\,W_1}=\frac{1047}{\sqrt{2}\cdot 260}=2,8\ a;$$

ток холостого хода

$$I_0=\sqrt{I_{0a}^2+I_{0r}^2}=\sqrt{0,055^2+2,8^2}\approx 2,8\ a.$$

Первичный ток трансформатора практически равен току холостого хода: $I_1\approx I_0=2,8\ a$, где $F_1=1047$ из табл. 12.

18. Проверка трансформатора на нагревание

Площадь открытых поверхностей охлаждения сердечника и обмоток трансформатора

$$S_{сер}\approx 2(a_1+b_s''+b_s'+b'+a_2+l_3)\,b_1-l_2b_1=$$
$$=2(4,5+2,1+2,1+0,9+0,35+11,3)\,4,5-$$
$$-0,9\cdot 4,5\approx 92\ см^2;$$

$$S_{обм}\approx 4(a_1+b_1+4\varepsilon_0'+4\delta_1)(l_1-l_p)=$$
$$=4(4,5+4,5+4\cdot 0,15+4\cdot 0,81)\cdot(5,4+3,3)=445\ см^2.$$

Превышение температуры сердечника и обмоток трансформатора над окружающей средой

$$\theta=\frac{P_{к1}+P_{к.р}+P_c}{\alpha_0(S_{сер}+S_{обм})}+\Delta\theta^\circ=\frac{7,1+11,4+6,6}{14\cdot 10^{-4}(92+445)}+10\approx 44^\circ\,C,$$

что вполне допустимо.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ИМПУЛЬСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Импульсным трансформатором называется специальный тип трансформатора, который служит для трансформации кратковременных импульсов напряжения при-

близительно прямоугольной формы длительностью порядка нескольких микросекунд и менее, периодически повторяющихся с частотой примерно 500—2000 *гц* или более. В некоторых случаях частота следования импульсов может быть значительно выше указанной. Эти трансформаторы находят широкое применение в технике радиолокации, телевидения и импульсной радиосвязи. При помощи их в этих областях техники осуществляется повышение амплитуды импульса напряжения, согласование полных сопротивлений источника напряжения и нагрузки, изменение полярности импульсов и межкаскадная связь в усилителях.

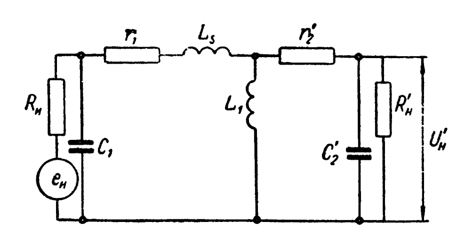


Рис. 34. Схема замещения импульсного трансформатора.

Импульсные трансформаторы должны удовлетворять требованию возможно меньшего искажения передачи формы трансформируемых импульсов напряжения. Искажение формы этих импульсов обусловливается возникновением в трансформаторах паразитных переходных процессов вследствие наличия в них емкостей и индуктивностей рассеяния обмоток. Эти параметры обмоток являются значительным препятствием прохождению через трансформатор очень коротких импульсов напряжения.

Для уменьшения искажения формы трансформируемых импульсов напряжения необходимо при проектировании импульсных трансформаторов стремиться к возможно большему уменьшению указанных параметров их обмоток путем применения сердечников из специальных магнитных сплавов и использования обмоток надлежащей конструкции. При этом большое значение имеет уменьшение размеров сердечника и числа витков обмоток.

Для анализа переходных процессов в импульсных трансформаторах обычно пользуются схемой замещения трансформатора, учитывающей как паразитные индуктивности, так и емкости обмоток (рис. 34). В этой схеме использованы следующие обозначения: $e_и$ — э. д. с. источника питания; $R_и$ — активное сопротивление источника питания; C_1 — суммарная емкость первичной обмотки трансформатора и источника питания; r_1 — активное сопротивление первичной обмотки; L_s — индуктивность рассеяния обмоток; L_1 — индуктивность намагничивания трансформатора; C'_2 — суммарная емкость вторичной обмотки и нагрузки, приведенная к первичной; r'_2 — активное сопротивление вторичной обмотки, приведенное к первичной; $R'_н$ — активное сопротивление нагрузки, приведенное к числу витков первичной обмотки трансформатора.

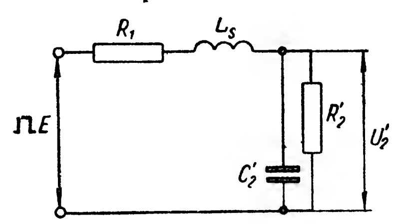


Рис. 35. Упрощенная схема замещения импульсного трансформатора.

Так как анализ процессов в схеме рис. 34 затруднителен, то эту схему без большой погрешности можно упростить, учитывая, что $L_1 \approx \infty$ и по сравнению с L_s очень велика, а $C'_2 \gg C_1$. Тогда с учетом влияния вихревых токов сердечника в виде сопротивления $r_{вх}$ упрощенная схема замещения импульсного трансформатора при приложении прямоугольного импульса напряжения к первичной обмотке примет вид рис. 35. В этой схеме

$$R_1 = R_и + r_1; \qquad R'_2 = \frac{r_{вх}(R'_н + r'_2)}{r_{вх} + R'_н + r'_2}.$$

Введем следующие обозначения [4]:

$$1 + \frac{R_1}{R'_2} = 1 + \gamma_R; \qquad z_T = \sqrt{\frac{L_s}{C'_2}}; \quad U'_2 = \frac{E}{1+\gamma_R}, \quad (29)$$

где $z_Г$ — волновое сопротивление трансформатора.

Паразитная постоянная времени трансформатора определяется по формуле:

$$T_1 = \sqrt{\frac{L_s C'_2}{1+\gamma_R}}.$$

Параметр, определяющий характер переходного процесса в трансформаторе,

$$\rho = \frac{1}{2\sqrt{1+\gamma_R}}\left(\frac{z_T}{R_2'} + \gamma_R \frac{R_2'}{z_T}\right). \tag{30}$$

Как показывает решение дифференциальных уравнений переходных процессов в импульсном трансформаторе по схеме рис. 35, при приложении к его первичной обмотке прямоугольного импульса напряжения относительная величина трансформируемого вторичного напряжения будет равна [4]:

а) при колебательном процессе в обмотках

$$\frac{u_2'}{U_2'} = 1 - \frac{e^{-\rho \frac{t}{T_1}}}{\nu} \cdot \sin(\nu t + \varphi), \tag{31}$$

где $\nu = \sqrt{1-\rho^2}$; $\operatorname{tg}\varphi = \frac{\rho}{\sqrt{1-\rho^2}}$; (31а)

б) при апериодическом процессе в обмотках

$$\frac{u_2'}{U_2'} = 1 + \alpha_1 e^{-s_1 \frac{t}{T_1}} - \alpha_2 e^{-s_2 \frac{t}{T_1}}, \tag{32}$$

где

$$s_1 = \rho - \sqrt{\rho^2 - 1}; \qquad s_2 = \rho + \sqrt{\rho^2 - 1};$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{\sqrt{\rho^2-1}} - 1\right); \quad \alpha_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{\sqrt{\rho^2-1}} + 1\right). \tag{32а}$$

При данном значении параметра ρ паразитная постоянная времени T_1 определяет длительность фронта трансформируемого импульса напряжения, поэтому она должна быть возможно меньшей по сравнению с длительностью импульса $\tau_и$, чтобы искажение последнего было минимальным. Если фронт импульса составляет величину $\tau_ф$, то паразитная постоянная не должна превышать значения $T_1 \leqslant \frac{1}{3}\tau_ф$. Например, при $\tau_и = 1$ *мксек* и $\tau_ф = 0{,}1\tau_и$ паразитная постоянная не должна быть больше величины $T_1 \approx 0{,}03$ *мксек*.

Если к первичной обмотке импульсного трансформатора при разомкнутой вторичной подводится прямоугольный импульс напряжения $u_1 = U_1 = \text{const}$, то

скорость изменения индукции в сердечнике трансформатора должна быть постоянной, так как

$$u_1 = -e_1 = W_1 S_c \frac{dB_c}{dt} 10^2 = \text{const},$$

следовательно, индукция в сердечнике $B_c = f(t)$ должна нарастать во времени по линейному закону (рис. 36).

Приращение индукции в сердечнике определяется по формуле

$$\Delta B_{ct} = \frac{10^{-2}}{W_1 S_c} \cdot \int_0^t u_1 dt = \frac{U_1 \cdot 10^{-2} t}{W_1 S_c} \quad [\textit{тл}], \qquad (33)$$

где W_1 — число витков первичной обмотки; S_c — поперечное сечение стержня сердечника, *см*²; U_1 — амплитуда импульса первичного напряжения, *в*; t — время, *мксек*.

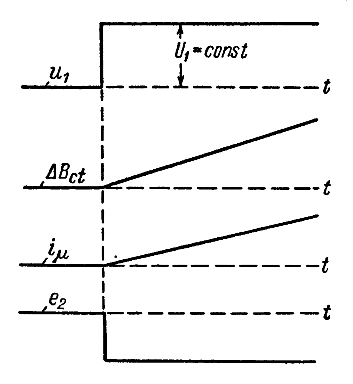


Рис. 36. Переходные процессы в импульсном трансформаторе.

При линейном нарастании во времени индукции в сердечнике намагничивающий ток импульсного трансформатора i_μ за время действия импульса напряжения также нарастает по линейному закону (рис. 36).

К моменту окончания действия импульса напряжения $t = \tau_и$ приращение индукции в сердечнике, согласно уравнению (33), достигнет величины

$$\Delta B_c = \frac{U_1 \cdot 10^{-2} \tau_и}{W_1 S_c} \quad [\textit{тл}]. \qquad (34)$$

При периодическом намагничивании сердечника импульсного трансформатора в нем имеет место гистерезис, характеризуемый определенной петлей с остаточной индукцией B_0 и коэрцитивной силой $H_к$. В этом случае при периодически повторяющихся с определенной частотой прямоугольных импульсах напряжения длительностью $\tau_и$ *мксек* процесс намагничивания сердечника трансформатора будет протекать по ряду частных циклов,

пока не достигнет предельного частного цикла петли гистерезиса (рис. 37).

Предельная петля частного цикла определяет магнитую проницаемость μ_Δ на этом цикле:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{MN}{O'N} = k' \frac{\Delta B}{\Delta H} = k'\mu_\Delta, \tag{35}$$

где k' — масштабный коэффициент.

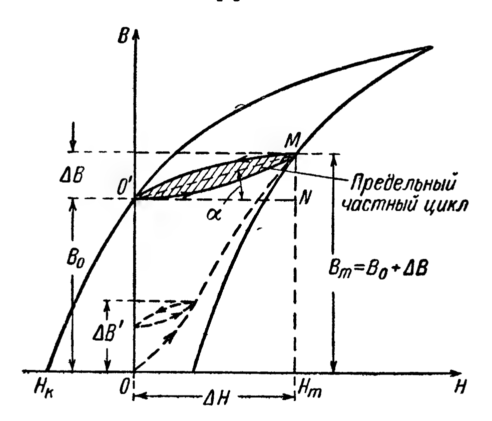


Рис. 37. Процесс намагничивания импульсного трансформатора.

Для импульсного режима работы трансформатора наиболее подходящими являются такие магнитные материалы, которые обладают низкой величиной остаточной индукции B_0 и высоким значением индукции насыщения B_m (рис. 37). Это позволяет получить достаточно высокие приращения индукции в сердечниках трансформаторов $\Delta B_{max} = B_m - B_0$.

II. РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Исходными данными для расчета импульсного трансформатора являются следующие величины:

мощность в импульсе P_2 [*вт*] или [*квт*];
напряжения в импульсе U_1 и U_2 [*в*];
сопротивление нагрузки $R_н$ [*ом*];
сопротивление источника $R_и$ [*ом*];
длительность импульса $\tau_и$ [*мксек*];

частота следования импульсов $f_п$ [*гц*];

коэффициент искажения плоской части импульса λ.

Под коэффициентом искажения плоской части импульса понимается относительная величина понижения напряжения этой части к моменту окончания импульса:

$$\lambda = \frac{\Delta U}{U} = \frac{I_{к\mu}}{I'_2} = 0{,}03 \div 0{,}08,$$

где I'_2 — приведенный к первичной обмотке ток нагрузки; $I_{к\mu}$ — ток кажущегося намагничивания, представляющий собой сумму действительного намагничивающего тока и составляющей, компенсирующей влияние размагничивающего действия вихревых токов в сердечнике трансформатора.

Нагрузкой импульсного трансформатора обычно является нелинейное сопротивление, имеющее приблизительно активный характер, как, например, магнетронный генератор, ламповый генератор, цепь сетки генераторной лампы, или в некоторых случаях чисто активное сопротивление. Нелинейный характер сопротивления нагрузки за время действия импульса напряжения сравнительно мало влияет на переходные процессы в трансформаторе, поэтому данное сопротивление практически можно принимать активным, равным некоторому постоянному среднему значению $R_н$. Ввиду такого характера нагрузки отдаваемая импульсным трансформатором мощность обычно измеряется в ваттах или киловаттах.

1. Определение средней мощности и токов трансформатора

В импульсных трансформаторах малой мощности отдаваемая вторичной обмоткой мощность в импульсе находится в диапазоне от нескольких десятков ватт до нескольких сотен киловатт, что соответствует средней мощности трансформатора за период посылки импульса в пределах от единиц до нескольких сотен ватт. Такое соотношение между средней и импульсной мощностями трансформатора обусловливается тем, что длительность импульса $\tau_и$ измеряется микросекундами, а период посылки его $T_п$ — миллисекундами, так что отношение $\tau_и$ к $T_п$ составляет величину порядка 10^{3}.

Напряжения малых импульсных трансформаторов указанного диапазона мощностей обычно находятся в следующих пределах: низшее напряжение $100 \div 2500$ *в*; высшее напряжение $300 \div 12500$ *в*.

Средняя отдаваемая мощность импульсного трансформатора может быть определена следующим образом:

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T_{\text{п}}} \int\limits_0^{\tau_{\text{и}}} P_2\, dt = P_2 \frac{\tau_{\text{и}}}{T_{\text{п}}} = f_{\text{п}} \tau_{\text{и}} P_2,$$

где $P_2 = U_2 I_2 = \frac{U_2^2}{R_{\text{н}}}$ — заданная мощность вторичной обмотки в импульсе, *вт*; $f_{\text{п}} = \frac{1}{T_{\text{п}}}$ — заданная частота следования импульсов, *гц*; $\tau_{\text{и}}$ — длительность импульса по заданию, *сек*.

Токи первичной и вторичной обмоток в импульсе:

$$I_1 = \frac{P_2}{U_1}\ [a]; \qquad I_2 = \frac{P_2}{U_2}\ [a].$$

Эффективные, или действующие значения токов первичной и вторичной обмоток импульсного трансформатора определяются из условия, что потери в этих обмотках при прохождении через них коротких прямоугольных импульсов тока обусловливаются не только омическими сопротивлениями обмоток, но также явлением поверхностного эффекта в проводах и влиянием токов наводки в них. С учетом этих явлений действующие значения первичного и вторичного токов импульсного трансформатора можно представить так [6]:

$$I_{1\text{эф}} = I_1 \sqrt{f_{\text{п}} \tau_{\text{и}} k_{\text{н}} k_{\text{п}1}}\ [a];$$
$$I_{2\text{эф}} = I_2 \sqrt{f_{\text{п}} \tau_{\text{и}} k_{\text{н}} k_{\text{п}2}}\ [a],$$

где $f_{\text{п}}$ — заданная частота следования импульсов, *гц*; $\tau_{\text{и}}$ — заданная длительность импульса, *сек*; $k_{\text{н}} = 2,4 \div 2,8$ — коэффициент, учитывающий ток наводки в проводах обмоток при прямоугольном импульсе токов; $k_{\text{п}1}$ и $k_{\text{п}2}$ — коэффициенты поверхностного эффекта в голых медных проводах круглого сечения, которые предварительно можно принять в следующих пределах: для обмотки низшего напряжения $k_{\text{п}1} = 1,2 \div 1,6$; для обмотки высшего напряжения $k_{\text{п}2} = 1,1 \div 1.4$.

В ряде случаев через вторичную обмотку импульсных трансформаторов проходит как импульсный ток, так и ток накала. Действующее значение суммы токов импульса и накала во вторичной обмотке в этом случае можно определить с помощью формулы:

$$I_{эф} = \sqrt{I^2_{2эф} + I^2_{н.\,эф}}\ [a].$$

2. Типы импульсных трансформаторов

По конструкции сердечников импульсные трансформаторы, как и обычные силовые трансформаторы малой мощности, могут быть стержневого и броневого типов. Однако малые импульсные трансформаторы, применяемые, например, для блокинг-генераторов или в качестве межкаскадных трансформаторов в усилителях, в большинстве своем выполняются стержневого типа.

Материалом для сердечников импульсных трансформаторов обычно служит листовая горячекатаная электротехническая сталь марки Э44 и холоднокатаная сталь марок Э310 и Э340 толщиной листа 0,10 ÷ 0,20 *мм* (ГОСТ 802—58, Приложение V). Применяются также специальные магнитные сплавы той же или меньшей толщины, как, например, пермаллой разных марок и т. д. Эти материалы выпускаются как в листах, так и в виде ленты. Они обладают повышенными магнитными качествами в направлении прокатки, поэтому сердечники импульсных трансформаторов часто изготовляются из длинной ленты навитого типа по пути магнитного потока.

В качестве изоляции между листами сердечника трансформатора служат порошкообразная окись кремния или магния и оксидная изоляция. Из-за малой толщины листов коэффициент заполнения поперечного сечения сердечника сталью в импульсных трансформаторах несколько меньше, чем в обычных, и составляет величину $k_з = 0,80 \div 0,90$.

В последнее время для сердечников малых импульсных трансформаторов, предназначенных для преобразования импульсов длительностью менее одной микросекунды при больших частотах их следования, применяют новый магнитный материал, называемый ферритом. По своим магнитным свойствам ферриты относятся к

низкокоэрцитивным магнитным материалам, занимающим промежуточное положение между указанными выше металлическими магнитными материалами и магнитодиэлектриками. Благодаря высокому удельному электросопротивлению ферритов потери на вихревые токи в них в переменных полях при больших частотах получаются небольшими.

Ферриты имеют мелкозернистую структуру, обладают значительной твердостью и поэтому плохо обрабатываются обычным режущим инструментом. Их обработка возможна только с помощью абразивов.

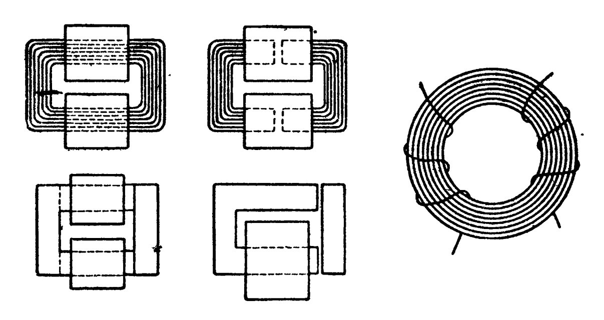


Рис. 38. Типы сердечников импульсных трансформаторов.

Технология изготовления ферритов аналогична технологии производства керамики. Детали прессуются из смеси окислов при давлении $1 \div 3$ *т/см*^{2}; реакция образования ферритов происходит в опрессованных деталях при температуре $1100 \div 1400°$ С. При этом в процессе спекания деталей происходит их усадка в пределах 10—20%. Применение данного материала для сердечников малых импульсных трансформаторов целесообразно только при частотах следования импульсов порядка нескольких десятков килогерц.

Обмотки малых импульсных трансформаторов выполняются обычно одно- или двухслойными цилиндрического типа в целях уменьшения индуктивности рассеяния.

Различные типы сердечников малых импульсных трансформаторов стержневого типа представлены на рис. 38.

Импульсные трансформаторы на рабочие напряжения до 6 *кв* обычно выполняются с воздушным охлаждением, а при напряжениях свыше 6 *кв*, по условиям изоляции обмоток, делаются с масляным охлаждением.

Особенностью конструкции малых импульсных трансформаторов является компактность их сердечника и обмоток для обеспечения возможно меньших значений индуктивности рассеяния и распределенной емкости. В связи с этим при очень малых мощностях в импульсе нередко приходится применять неразрезные тороидальные сердечники.

3. Выбор приращения индукции и толщины листов материала сердечника

При расчете задаются величиной приращения индукции ΔB_c за импульс в зависимости от мощности в импульсе и по магнитным характеристикам материала

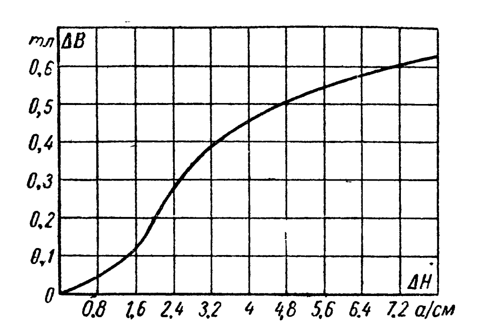


Рис. 39. Кривая намагничивания на частном цикле стали марок Э44 и Э310.

сердечника (рис. 39) находят проницаемость μ_Δ по соотношению

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta B_c}{\Delta H}.$$

Выбор ΔB_c предварительно производится по табл. 13.

Далее выбирают толщину листов сердечника из условия $\tau_и = (2 \div 3)\, T_{вх}$. Постоянная времени контуров

вихревых токов в сердечнике определяется соотношением [4]:

$$T_{вх} \approx \frac{1{,}6\mu_{\Delta}\delta_{c}^{2}}{\rho_{c}} \ [мксек],$$

где δ_c — толщина листа сердечника, *см*; ρ_c — удельное электрическое сопротивление материала сердечника, *ом·см²/см*.

Так, например, для холоднокатаной стали марок Э310 и Э340 $\rho_c = 0{,}5 \cdot 10^{-4}$ *ом·см²/см* и для горячекатаной стали марки Э44 $\rho_c = 0{,}6 \cdot 10^{-4}$ *ом·см²/см*.

Таблица 13

Приращение индукции ΔB_c, *тл*	Мощность в импульсе P_2, *квт*
0,01—0,05	до 0,005
0,05—0,10	0,005—0,05
0,10—0,30	0,05 —50
0,30—0,50	50—500

4. Определение поперечного сечения стержня и средней длины магнитопровода сердечника трансформатора

Соотношение между поперечным сечением стержня сердечника импульсного трансформатора S_c и средней длиной его магнитопровода l представляется в следующем виде [4]:

$$\frac{\Delta B_c^2 S_c l \cdot 10^2}{\mu_{\Delta}\tau_{и}} = \lambda U_1 I_2' = \lambda P_2,$$

откуда объем сердечника трансформатора

$$S_c l = \frac{\mu_{\Delta}\tau_{и}\lambda P_2 \cdot 10^{-2}}{\Delta B_c^2} \ [см^3].$$

Так как размеры сердечника импульсного трансформатора должны быть возможно меньшими, а средняя длина его магнитопровода l близка к средней длине витка обмоток l_w, то отношение поперечного сечения стержня S_c к длине магнитопровода l в малых

трансформаторах стержневого типа обычно находится в следующих пределах:

$$\psi = \frac{S_c}{l} = 0,18 \div 0,32 \ [см],$$

хотя в отдельных случаях встречаются отступления от указанных значений ψ в меньшую или большую стороны.

Поперечное сечение стержня

$$S_c = \frac{1}{10 \cdot \Delta B_c} \cdot \sqrt{\mu_\Delta \tau_и \lambda \psi P_2} \ [см^2],$$

а средняя длина магнитопровода сердечника

$$l = \frac{S_c}{\psi} \ [см],$$

где P_2 — заданная мощность трансформатора в импульсе [*вт*], λ и $\tau_и$ берутся из задания, ΔB_c и μ_Δ — из позиции 3.

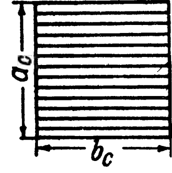


Рис. 40. Форма поперечного сечения стержня импульсного трансформатора.

Поперечные сечения стержней и ярем импульсного трансформатора выполняются одинаковыми и прямоугольной формы (рис. 40), при этом отношение

$$\zeta = \frac{b_c}{a_c} = 1,0 \div 2,0.$$

Размеры поперечного сечения стержней и ярем сердечника трансформатора определяются следующим образом:

$$a_c = \sqrt{\frac{S_c}{\zeta k_з}} \ [см];$$

$$b_c = \zeta a_c \ [см],$$

где $k_з = 0,8 \div 0,9$ — коэффициент заполнения сталью сечения стержня.

5. Определение числа витков обмоток трансформатора

Число витков первичной и вторичной обмоток импульсного трансформатора определяется по формуле (34):

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^{-2} \tau_и}{\Delta B_c S_c}; \quad W_2 = W_1 \frac{U_2}{U_1};$$

при этом число вольт, приходящихся на один виток,

$$e_w = \frac{U_1}{W_1} \ [в/виток],$$

где $\tau_и$ — заданная длительность импульса, *мксек*, U_1 и U_2 берутся из задания, ΔB_c — из позиции 3, S_c — из позиции 4.

6. Определение сечения и диаметра проводов обмоток

В малых импульсных трансформаторах при мощностях в импульсе менее киловатта средние потери в меди обмоток, даже при малом диаметре провода, ничтожно малы в отношении допустимого нагрева. Поэтому поперечное сечение проводов обмоток в этом случае выбирается из соображений удобства намотки, размеров окна в сердечнике и получения возможно малого сопротивления обмотки по сравнению с сопротивлением нагрузки.

При мощностях в импульсе более киловатта поперечное сечение проводов обмоток выбирается по допустимой плотности тока.

Предварительные значения поперечных сечений проводов первичной и вторичной обмоток

$$q_1' = \frac{I_{1\,эф}}{j_1'} \ [мм^2]; \qquad q_2' = \frac{I_{2\,эф}}{j_2'} \ [мм^2],$$

где $I_{1эф}$ и $I_{2эф}$ берутся из позиции 1 главы шестой.

Окончательные значения сечений и диаметров этих проводов выбираются по ближайшим данным ГОСТа из Приложения I:

$$q_1 = \ldots \ [мм^2]; \ d_1/d_{1и} = \ldots \ [мм]; \ q_2 = \ldots \ [мм^2];$$
$$d_2/d_{2и} = \ldots \ [мм].$$

В малых импульсных трансформаторах наибольшая плотность тока в проводах обмоток по условиям допустимого нагрева может быть принята в следующих пределах: $j = 2 \div 3$ *а/мм*^{2} при естественном воздушном охлаждении и $j = 4 \div 7$ *а/мм*^{2} при естественном масляном охлаждении.

В некоторых случаях по условиям укладки проводов на стержне приходится отступать в сторону меньших значений плотностей тока, чем указанные.

7. Укладка обмоток и уточнение размеров окна сердечника трансформатора

Для получения возможно меньшей индуктивности рассеяния и уменьшения распределенной емкости между обмотками импульсного трансформатора эти обмотки следует выполнять по возможности однослойными или малослойными. В малых трансформаторах этого типа при мощностях в импульсе до нескольких сотен киловатт обмотки удается обычно выполнять однослойными и реже двухслойными.

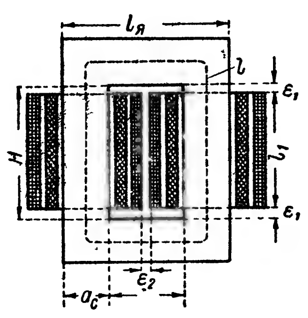


Рис. 41. Основные размеры импульсного трансформатора.

При однослойном выполнении первичной обмотки и размещении ее на двух стержнях сердечника трансформатора длина, занимаемая ею по высоте стержня (рис. 41), равна

$$l_1 = \frac{W_1}{2} d_{1и} \; [см],$$

где W_1 берется из позиции 5, $d_{1и}$ — из позиции 6.

При размещении обмоток на одном стержне

$$l_1 = W_1 d_{1и} \; [см].$$

Высота окна сердечника трансформатора

$$H = l_1 + 2\varepsilon_1 \; [см],$$

где ε_1 — расстояние от обмотки до ярма [*см*], определяемое высшим напряжением обмоток (табл. 14).

Таблица 14

Высшее напряжение, *кв*	Расстояние от обмотки до ярма ε_1, *см*
До 0,5	0,1—0,2
0,5—2,0	0,2—0,6
3,0—6,0	0,8—1,2
6,0—12,0	1,4—1,8

Толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = d_{1и} \; [см].$$

Число витков вторичной обмотки в одном слое

$$n_2 = \frac{l_1}{d_{2и}},$$

где $d_{2и}$ берется из позиции 6.

Число слоев вторичной обмотки при размещении ее на двух стержнях

$$m_2 = \frac{W_2}{2n_2};$$

при размещении на одном стержне

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2}.$$

Диаметр провода $d_{2и}$ обычно уточняется так, чтобы можно было получить один или два полных слоя вторичной обмотки на длине l_1.

Толщина вторичной обмотки

$$\delta_2 = m_2 d_{2и} \ [см],$$

где W_2 берется из позиции 5.

При импульсном режиме работы трансформатора для уменьшения искажения прямоугольных импульсов напряжения необходимо, чтобы трансформатор обладал возможно малыми паразитными параметрами обмоток — индуктивностью рассеяния L_s и распределенной емкостью $C_р$. В этом случае волновое сопротивление обмоток импульсного трансформатора

$$z_T = \sqrt{\frac{L_s}{C_р}} \ [ом],$$

где индуктивность рассеяния первичной и вторичной обмоток, приведенная к первичной, определяется по известной формуле:

$$L_s = \frac{0{,}4\pi W_1^2 l_w}{l_s}\left(\delta_{12} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3}\right) \cdot 10^{-8} \ [гн],$$

а распределенная емкость между обмотками при однослойном или двухслойном исполнении их — по формуле плоского конденсатора [6]:

$$C_р = \frac{0{,}0855 \cdot \varepsilon \cdot l_w \cdot l_s}{\delta_{12}} \cdot 10^{-12} \ [ф].$$

В этих формулах δ_{12} — толщина изоляции между первичной и вторичной обмотками трансформатора, *см*; l_w — средняя длина витка обмоток, *см*; l_s — общая длина обмоток по высоте стержней сердечника, *см*; при расположении обмоток на одном стержне $l_s \approx l_1$, на двух — $l_s \approx 2l_1$; $\varepsilon = 3 \div 4$ — диэлектрическая проницаемость изоляции.

Максимальный коэффициент передачи энергии импульса при заданных значениях длительности импульса и сопротивления нагрузки $R_н$ теоретически достигается при условии равенства волнового сопротивления трансформатора и приведенного сопротивления нагрузки:

$$z_т = \sqrt{\frac{L_s}{C_р}} \approx R'_н.$$

Пренебрегая толщинами обмоток δ_1 и δ_2, получим приближенно следующее значение толщины изоляции между обмотками импульсного трансформатора:

$$\delta_{12} = \frac{R'_н l_s \sqrt{\varepsilon}}{377 \cdot W_1} \quad [см],$$

где $R'_н$ — активное сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке; $R'_н = R_н \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2$.

Однако по условиям электрической прочности изоляции между обмотками на практике нередко приходится отступать от полученного значения δ_{12} в сторону увеличения.

Ширина окна сердечника трансформатора при размещении обмоток на двух стержнях (рис. 41) определяется по следующей формуле:

$$c = 2(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2) + \varepsilon_2 \quad [см],$$

где $\varepsilon_0 = 0{,}2 \div 0{,}4$ *см* — толщина изоляции между обмоткой и стержнем, выполняемой обычно из электрокартона ЭВ (ГОСТ 2824—60, Приложение VII); ε_2 — расстояние между наружными поверхностями обмоток [*см*], определяемое по табл. 15.

При размещении обмоток на одном стержне

$$c = \varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \varepsilon'_2 \quad [см],$$

где ε'_2 — расстояние обмотки до необмотанного стержня, определяемое по табл. 14.

Отношение высоты окна сердечника к ширине его обычно находится в пределах

$$k=\frac{H}{c}=2\div 3.$$

Для ярма

$$l_{я}=c+2a_{c}\ [см].$$

Общая длина магнитопровода сердечника трансформатора окончательно определяется по формуле:

$$l=2(H+l_{я})\ [см],$$

где a_c берется из позиции 4; H — высота окна сердечника, *см*.

Окончательное значение отношения поперечного сечения стержня S_c к длине магнитопровода l

$$\psi=\frac{S_c}{l},$$

где S_c берется из позиции 4 главы шестой.

Таблица 15

Высшее напряжение, *кв*	Расстояние между обмотками соседних стержней ε_2, *см*
До 0,5	0,1—0,2
0,5—2,0	0,2—0,4
3,0—6,0	0,6—0,8
6,0—12,0	1,0÷1,4

8. Средние длины витков обмоток трансформатора

Так как в импульсных трансформаторах поперечное сечение стержня выполняется прямоугольной формы, то при однослойных или двухслойных цилиндрических обмотках средние длины витков их можно представить следующим образом:

средняя длина витка первичной обмотки

$$l_{w1}=2(a_c+b_c+4\varepsilon_0+2\delta_1)\ [см];$$

средняя длина витка вторичной обмотки

$$l_{w2}=2[a_c+b_c+4(\varepsilon_0+\delta_1+\delta_{12})+2\delta_2]\ [см];$$

средняя длина витка обеих обмоток

$$l_w = \frac{l_{w1} + l_{w2}}{2} \; [см],$$

где a_c и b_c берутся из позиции 4, δ_1, δ_2, δ_{12} и ε_0 — из позиции 7.

9. Масса меди и активные сопротивления обмоток

Масса меди первичной обмотки

$$G_{к1} = 8{,}9\, W_1 q_1 \cdot l_{w1} \cdot 10^{-5} \; [кг];$$

масса меди вторичной обмотки

$$G_{к2} = 8{,}9\, W_2 q_2 \cdot l_{w2} \cdot 10^{-5} \; [кг];$$

общая масса меди обмоток

$$G_к = G_{к1} + G_{к2} \; [кг].$$

Активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора при 75° C

$$r_1 = 1{,}22 \cdot \frac{W_1 \cdot l_{w1}}{5700 \cdot q_1} \; [ом]; \quad r_2 = 1{,}22 \cdot \frac{W_2 \cdot l_{w2}}{5700 \cdot q_2} \; [ом],$$

где W_1 и W_2 берутся из позиции 5, q_1 и q_2 — из позиции 6, l_{w1} и l_{w2} — из позиции 8.

10. Потери в обмотках

Так как в обмотках импульсных трансформаторов проходят короткие прямоугольные импульсы тока, то потери в них обусловливаются не только омическим сопротивлением, но также явлением поверхностного эффекта в проводах и влиянием тока наводки в них при прохождении по обмоткам тока импульса. Средние потери в этих обмотках зависят от действующих значений токов в них и определяются по известным формулам:

$$P_{к1} = I_{1эф}^2 r_1 \; [вт]; \quad P_{к2} = I_{2эф}^2 r_2 \; [вт]; \quad P_к = P_{к1} + P_{к2} \; [вт],$$

где $I_{1эф}$ и $I_{2эф}$ берутся из позиции 1, r_1 и r_2 — из позиции 9.

11. Масса материала сердечника трансформатора

В случае сердечника трансформатора стержневого типа масса его

$$G_c = 7{,}6\ S_c l \cdot 10^{-3}\ [\text{кг}],$$

где S_c берется из позиции 4, l — из позиции 7.

12. Магнитные потери в сердечнике

Средние потери на вихревые токи в материале сердечника импульсного трансформатора за период посылки импульса можно определить следующим образом [4]:

$$P_{\text{вх}} = \frac{f_{\text{п}} \tau_{\text{и}} \delta_{\text{c}}^2 l U_1^2 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot W_1^2 S_{\text{c}} \rho_{\text{c}}}\ [\text{вт}],$$

где U_1, $f_{\text{п}}$ и $\tau_{\text{и}}$ берутся из задания, δ_{c} и ρ_{c} — из позиции 3, S_{c} — из позиции 4, W_1 — из позиции 5, l — из позиции 7.

Потерями на гистерезис в материале сердечника трансформатора практически можно пренебречь, поскольку они относительно малы.

Средняя мощность намагничивания материала сердечника импульсного трансформатора

$$P_m = f_{\text{п}} \frac{U_1^2}{L_1} \int\limits_0^{\tau_{\text{и}}} t\,dt = f_{\text{п}} \frac{U_1^2}{L_1} \cdot \frac{\tau_{\text{и}}^2}{2}\ [\text{вт}],$$

так как намагничивающий ток этого трансформатора за время импульса $i_\mu = \frac{U_1}{L_1} t$. Общая индуктивность первичной обмотки трансформатора

$$L_1 = \frac{W_1^2 \mu_\Delta S_{\text{c}} \cdot 10^{-4}}{l}\ [\text{гн}],$$

где U_1, $f_{\text{п}}$ и $\tau_{\text{и}}$ берутся из задания, μ_Δ — из позиции 3, S_{c} — из позиции 4, W_1 — из позиции 5, l — из позиции 7.

13. Коэффициент полезного действия трансформатора

Так как при передаче импульсов энергия, затрачиваемая за это время на намагничивание сердечника, является энергией потерь, то коэффициент полезного

действия импульсного трансформатора определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{P_{ср}}{P_{ср} + P_{к} + P_{вх} + P_{m}} \cdot 100,$$

где $P_{ср}$ берется из позиции 1, $P_{к}$ — из позиции 10, $P_{вх}$ и P_{m} — из позиции 12.

14. Намагничивающий ток трансформатора

Намагничивающий ток импульсного трансформатора состоит из двух составляющих — действительного намагничивающего тока и составляющей, компенсирующей влияние размагничивающего действия вихревых токов в сердечнике трансформатора. Сумма этих составляющих называется током кажущегося намагничивания, который определяется с помощью следующего соотношения [4]:

$$I_{к\mu} \approx \frac{\tau_{и} l \cdot 10^{-2}}{\mu_{\Delta} W_{1}^{2} \cdot S_{c}} \cdot U_{1} \; [a],$$

где $\tau_{и}$ — длительность импульса напряжения, *мксек*; U_1 и $\tau_{и}$ берутся из задания, μ_{Δ} — из позиции 3, S_{c} — из позиции 4, W_1 — из позиции 5, l — из позиции 7.

15. Параметры импульсного трансформатора и проверка искажения трансформируемого импульса напряжения

Активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора (позиция 9)

$$r_1 = \ldots \; [ом]; \quad r_2' = r_2 \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 \; [ом],$$

где W_1 и W_2 берутся из позиции 5.

Эквивалентное активное сопротивление контуров вихревых токов в материале сердечника трансформатора, приведенное к числу витков первичной обмотки [4]:

$$r_{вх} = \frac{12 \cdot W_1^2 S_{c} \rho_{c}}{\delta_{c}^{2} \cdot l} \; [ом],$$

где δ_{c} и ρ_{c} берутся из позиции 3, S_{c} — из позиции 4, W_1 — из позиции 5, l — из позиции 7.

Активные сопротивления упрощенной схемы замещения трансформатора (рис. 35) таковы:

$$R_1 = R_и' + r_1; \quad R_н' = R_н \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2; \quad R_2' = \frac{r_{вх}(R_н' + r_2')}{r_{вх} + R_н' + r_2'}.$$

Индуктивность рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора, приведенная по известной формуле к первичной обмотке (позиция 7),

$$L_s = \frac{0{,}4\pi W_1^2 l_w}{l_s}\left(\delta_{12} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3}\right) \cdot 10^{-8} \, [гн].$$

Распределенная емкость между обмотками при однослойном или двухслойном исполнении их (позиция 7)

$$C_р = \frac{0{,}0885 \cdot \varepsilon \cdot l_w l_s}{\delta_{12}} 10^{-12} \, [ф],$$

где W_1 берется из позиции 5, δ_1, δ_2, δ_{12}, ε и l_s — из позиции 7, l_w — из позиции 8.

Волновое сопротивление обмоток импульсного трансформатора по уравнению (29)

$$z_Г = \sqrt{\frac{L_s}{C_р}} \, [ом],$$

где принято, что $C_2' = C_р$.

Электродвижущая сила источника прямоугольных импульсов напряжения с внутренним омическим сопротивлением $R_и$ при активном сопротивлении первичной обмотки трансформатора r_1 по уравнению (29) определяется так:

$$E = U_2'(1 + \gamma_R) \, [в],$$

где $U_2' = U_2 \cdot \frac{W_1}{W_2}$; $\gamma_R = \frac{R_1}{R_2'}$.

Характер переходных процессов в трансформаторе определяется уравнениями (30) — (32) в зависимости от величины параметра ρ.

16. Проверка трансформатора на нагревание

Так как потери в обмотках малых импульсных трансформаторов относительно малы по сравнению с магнитными потерями в сердечнике, то нагрев обмоток практически не представляет опасности и расчетную проверку их температуры можно не производить.

Основные потери энергии в рассматриваемых трансформаторах сосредочены в их сердечнике, что приводит к заметному нагреванию последнего. Установившееся превышение температуры сердечника трансформатора над температурой окружающей среды можно определить по известной формуле:

$$\theta \approx \frac{P_{вх} + P_m}{\alpha_0 S_{сер}} \ [°C],$$

где $P_{вх} + P_m$ — магнитные потери в сердечнике трансформатора из позиции 12, *вт*; $\alpha_0 = (13 \div 15) \times \times 10^{-4}$ — коэффициент теплоотдачи открытой торцевой поверхности сердечника, *вт/см² град;* $S_{сер}$ — площадь открытой торцевой поверхности сердечника, *см²*.

Площадь открытой торцевой поверхности сердечника может быть определена следующим образом:

а) при размещении обмоток на одном стержне и сборке сердечника впереплет

$$S_{сер} \approx 4a_c b_c + 2b_c l_я + b_c \cdot H \ [см^2];$$

б) при размещении обмоток на двух стержнях (рис. 41)

$$S_{сер} \approx 4a_c b_c + 2b_c l_я \ [см^2],$$

где a_c и b_c берутся из позиции 4, H и $l_я$ — из позиции 7.

В малых трансформаторах допустимое превышение температуры сердечника над окружающей средой при воздушном охлаждении может составлять $\theta = 60 \div 65°$ C при температуре этой среды 40° C и изоляции обмоток класса *A*.

III. ПРИМЕР РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Задание

Мощность в импульсе $P_2 = 10$ *квт*.

Напряжения в импульсе $U_1 = 500$ *в*, $U_2 = 2000$ *в*.

Сопротивление нагрузки $R_н = 400$ *ом*.

Сопротивление источника $R_и = 30$ *ом*.

Длительность импульса $\tau_и = 1$ *мксек*.

Частота следования импульсов $f_п = 1000$ *гц*.

Коэффициент искажения плоской части импульса $\lambda = 0{,}06$.

1. Средняя мощность и токи трансформатора

$$P_{ср}=f_{п}\tau_{и}P_2=1000\cdot10^{-6}\cdot10\cdot10^3=10\ вт;$$

$$I_1=\frac{P_2}{U_1}=\frac{10000}{500}=20\ a;\quad I_2=\frac{P_2}{U_2}=\frac{10000}{2000}=5\ a;$$

$$I_{1эф}=I_1\sqrt{f_{п}\tau_{и}k_{н}k_{п1}}=20\sqrt{1000\cdot10^{-6}\cdot2{,}4\cdot1{,}4}\approx1{,}2\ a;$$

$$I_{2эф}=I_2\sqrt{f_{п}\tau_{и}k_{н}k_{п2}}=5\sqrt{1000\cdot10^{-6}\cdot2{,}4\cdot1{,}1}\approx0{,}26\ a,$$

где принято, что $k_{п1}=1{,}4$; $k_{п2}=1{,}1$.

2. Тип трансформатора

Выбираем сердечник трансформатора стержневого типа с однослойной первичной и двухслойной вторичной обмотками цилиндрического типа, расположенными на одном стержне. Материал сердечника — горячекатаная листовая электротехническая сталь по ГОСТу 802—58 марки Э44 (Приложение V), толщина которой определяется ниже. Охлаждение трансформатора — воздушное.

3. Выбор приращения индукции и толщины материала сердечника

Принимаем, что приращение индукций за импульс $\Delta B_c=0{,}2\ тл$, и затем по кривой рис. 39 находим $\Delta H=2\ а/см$. Магнитная проницаемость материала $\mu_\Delta=\frac{\Delta B_c}{\Delta H}=0{,}1$.

Далее примем $T_{вх}\approx\frac{1}{3}\tau_{и}=0{,}3\ мксек$, тогда толщина листов сердечника будет

$$\delta_c=\sqrt{\frac{\rho_c T_{вх}}{1{,}6\mu_\Delta}}=\sqrt{\frac{0{,}5\cdot10^{-4}\cdot0{,}3}{1{,}6\cdot0{,}1}}=0{,}0097\ см.$$

Окончательно примем $\delta_c=0{,}01\ см$.

4. Размеры сердечника трансформатора

Поперечное сечение стержня сердечника

$$S_c=\frac{1}{10\cdot\Delta B_c}\cdot\sqrt{\mu_\Delta\tau_{и}\lambda\psi P_2}=\frac{1}{10\cdot0{,}2}\times$$

$$\times\sqrt{0{,}1\cdot1\cdot0{,}06\cdot0{,}20\cdot10000}\approx1{,}8\ см^2;$$

средняя длина магнитопровода

$$l = \frac{S_c}{\psi} = \frac{1,8}{0,20} = 9 \text{ см},$$

где принято $\psi = 0,20$.

Размеры поперечного сечения стержня следующие:

$$a_c = \sqrt{\frac{S_c}{k_3 \zeta}} = \sqrt{\frac{1,8}{0,85 \cdot 1,8}} \approx 1,1 \text{ см};$$

$$b_c = \zeta a_c = 1,8 \cdot 1,1 = 2,0 \text{ см}.$$

5. Число витков первичной и вторичной обмоток

$$W_1 = \frac{U_1 \tau_и \cdot 10^{-2}}{\Delta B_c S_c} = \frac{500 \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{0,2 \cdot 1,8} \approx 14;$$

$$W_2 = W_1 \frac{U_2}{U_1} = 14 \cdot \frac{2000}{500} = 56;$$

$$e_w = \frac{U_1}{W_1} = \frac{500}{14} = 35,7 \text{ в/виток}.$$

6. Сечение и диаметр проводов обмоток

Предварительные значения поперечных сечений проводов первичной и вторичной обмоток

$$q_1' = \frac{I_{1эф}}{j_1'} = \frac{1,2}{3,0} = 0,40 \text{ мм}^2;$$

$$q_2' = \frac{I_{2эф}}{j_2'} = \frac{0,26}{2,5} = 0,104 \text{ мм}^2.$$

Окончательные значения сечений и диаметров проводов обмоток по ГОСТу 6324—52 из Приложения I принимаем следующими:

$$q_1 = 0,407 \text{ мм}^2; \; d_1/d_{1и} = 0,72/0,94 \text{ мм};$$

марка провода ПБД;

$$q_2 = 0,113 \text{ мм}^2; \; d_2/d_{2и} = 0,38/0,49 \text{ мм};$$

марка провода ПЭЛШО.

7. Укладка обмоток на сердечнике

При размещении обмоток на одном стержне

$$l_1 = W_1 d_{1и} = 14 \cdot 0,094 \approx 1,35 \text{ см}.$$

$$H = l_1 + 2\varepsilon_1 = 1,35 + 2 \cdot 0,22 = 1,8 \text{ см},$$

где в соответствии с табл. 14 принято $\varepsilon_1 = 0{,}22$ *см*. Толщина первичной обмотки $\delta_1 = d_{1и} \approx 0{,}09$ *см*.

Число витков в слое вторичной обмотки при двухслойном исполнении $(m_2 = 2)$

$$n_2 = \frac{W_2}{m_2} = \frac{56}{2} = 28.$$

Диаметр изолированного провода вторичной обмотки

$$d_{2и} = \frac{l_1}{n_2} = \frac{13{,}5}{28} \approx 0{,}49 \text{ мм}.$$

Поскольку значение $d_{2и}$ получилось тем же, что и в позиции 6, то дальнейшего уточнения не требуется и толщина вторичной обмотки $\delta_2 = m_2 d_{2и} = 2 \cdot 0{,}049 \approx \approx 0{,}10$ *см*.

Толщина изоляции между обмотками

$$\delta_{12} \approx \frac{R'_н l_s \sqrt{\varepsilon}}{377 \cdot W_1} = \frac{25 \cdot 1{,}35 \cdot \sqrt{3{,}5}}{377 \cdot 14} = 0{,}012 \text{ см},$$

где $l_s \approx l_1 = 1{,}35$ *см*; $R'_н = R_н \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 = 400 \left(\frac{14}{56}\right)^2 = 25$ *ом* и принято $\varepsilon = 3{,}5$.

В качестве изоляции между обмотками возьмем лакоткань ЛШС1 толщиной 0,12 *мм* (ГОСТ 2215—66, Приложение VI).

Ширина окна сердечника трансформатора при размещении обмоток на одном стержне

$$c = \varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \varepsilon'_2 = 0{,}2 + 0{,}09 + 0{,}012 + 0{,}10 + + 0{,}4 \approx 0{,}8 \text{ см},$$

где принято, что $\varepsilon_0 = 0{,}2$ *см*; $\varepsilon'_2 = 0{,}4$ *см*.

Отношение $k = \frac{H}{c} = \frac{1{,}8}{0{,}8} = 2{,}2$ находится в допустимых пределах.

Длина ярма

$$l_я = c + 2a_с = 0{,}8 + 2 \cdot 1{,}1 = 3{,}0 \text{ см}.$$

Окончательно общая длина магнитопровода сердечника

$$l = 2(H + l_я) = 2(1{,}8 + 3{,}0) = 9{,}6 \text{ см}.$$

Окончательное отношение

$$\psi = \frac{S_с}{l} = \frac{1{,}8}{9{,}6} = 0{,}19.$$

8. Средние длины витков обмоток

$$l_{w1}=2(a_c+b_c+4\varepsilon_0+2\delta_1)=2\cdot(1{,}1+2{,}0+40{,}2+$$
$$+2\cdot 0{,}09)\approx 8{,}2\ см.$$
$$l_{w2}=2[a_c+b_c+4(\varepsilon_0+\delta_1+\delta_{12})+2\delta_2]=2[1{,}1+2{,}0+$$
$$+4\cdot(0{,}2+0{,}09+0{,}012)+2\cdot 0{,}10]\approx 9{,}1\ см;$$
$$l_w=\frac{l_{w1}+l_{w2}}{2}=\frac{8{,}2+9{,}1}{2}\approx 8{,}6\ см.$$

9. Масса меди и активные сопротивления обмоток при 75°С

Массы меди обмоток

$$G_{к1}=8{,}9\cdot W_1\cdot q_1\cdot l_{w1}\cdot 10^{-5}=8{,}9\cdot 14\cdot 0{,}407\cdot 8{,}2\cdot 10^{-5}=$$
$$=0{,}0042\ кг;$$
$$G_{к2}=8{,}9\cdot W_2\cdot q_2\cdot l_{w2}\cdot 10^{-5}=8{,}9\cdot 56\cdot 0{,}113\cdot 9{,}1\cdot 10^{-5}=$$
$$=0{,}0052\ кг;$$
$$G_к=G_{к1}+G_{к2}=0{,}0042+0{,}0052=0{,}0094\ кг.$$

Активные сопротивления обмоток

$$r_1=1{,}22\cdot\frac{W_1\cdot l_{w1}}{5700\cdot q_1}=1{,}22\cdot\frac{14\cdot 8{,}2}{5700\cdot 0{,}407}=0{,}06\ ом;$$
$$r_2=1{,}22\cdot\frac{W_2\cdot l_{w2}}{5700\cdot q_2}=1{,}22\cdot\frac{56\cdot 9{,}1}{5700\cdot 0{,}113}=0{,}96\ ом.$$

10. Потери в обмотках при 75°С

$$P_{к1}=I_{1эф}^2 r_1=1{,}2^2\cdot 0{,}06\approx 0{,}086\ вт;$$
$$P_{к2}=I_{2эф}^2 r_2=0{,}26^2\cdot 0{,}96\approx 0{,}065\ вт;$$
$$P_к=P_{к1}+P_{к2}=0{,}086+0{,}065\approx 0{,}16\ вт.$$

11. Масса стали сердечника

$$G_c=7{,}6S_c\cdot l\cdot 10^{-3}=7{,}6\cdot 1{,}8\cdot 9{,}6\cdot 10^{-3}=0{,}131\ кг.$$

12. Магнитные потери в сердечнике

Потери на вихревые токи

$$P_{вх}=\frac{f_п\tau_и\delta_c^2 l U_1^2\cdot 10^{-6}}{12\cdot W_1^2 S_c\rho_c}=\frac{1000\cdot 1\cdot 0{,}01^2\cdot 9{,}6\cdot 500^2\cdot 10^{-6}}{12\cdot 14^2\cdot 1{,}8\cdot 0{,}5\cdot 10^{-4}}\approx 1{,}14\ вт.$$

Потери на намагничивание

$$P_m = f_п \frac{U_1^2}{L_1} \cdot \frac{\tau_и^2}{2} = 1000 \cdot \frac{500^2}{0{,}37 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{10^{-12}}{2} = 0{,}33 \; вт,$$

где индуктивность первичной обмотки

$$L_1 = \frac{W_1^2 \mu_\Delta S_c \cdot 10^{-4}}{l} = \frac{14^2 \cdot 0{,}1 \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-4}}{9{,}6} = 0{,}37 \cdot 10^{-3} \; гн.$$

13. Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_{ср}}{P_{ср} + P_к + P_{вх} + P_m} 100 = \frac{10}{10 + 0{,}16 + 1{,}14 + 0{,}33} \times$$
$$\times 100 \approx 86\%.$$

14. Намагничивающий ток трансформатора

$$I_{к\mu} \approx \frac{\tau_и l U_1 \cdot 10^{-2}}{\mu_\Delta W_1^2 S_c} = \frac{1 \cdot 9{,}6 \cdot 500 \cdot 10^{-2}}{0{,}1 \cdot 14^2 \cdot 1{,}8} = 1{,}36 \; а.$$

Проверяем коэффициент искажения плоской части импульса:

$$\lambda = \frac{I_{к\mu}}{I_1} = \frac{1{,}36}{20} = 0{,}068.$$

Получаем величину, близкую к принятой $\lambda = 0{,}06$.

15. Параметры трансформатора и проверка искажения импульса напряжения

Активные сопротивления обмоток

$$r_1 = 0{,}06 \; ом; \; r_2' = r_2 \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 = 0{,}96 \cdot \left(\frac{14}{56}\right)^2 = 0{,}06 \; ом.$$

Эквивалентное активное сопротивление контуров вихревых токов в стали сердечника

$$r_{вх} = \frac{12 \cdot W_1^2 S_c \rho_c}{\delta_c^2 l} = \frac{12 \cdot 14^2 \cdot 1{,}8 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-4}}{0{,}01^2 \cdot 9{,}6} = 221 \; ом;$$

Активные сопротивления схемы замещения (рис. 35)

$$R_1 = R_п + r_1 = 30 + 0{,}06 = 30{,}06 \; ом;$$

$$R_н' = R_н \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 = 400 \cdot \left(\frac{14}{56}\right)^2 = 25 \; ом;$$

$$R_2' = \frac{r_{вх}(R_н' + r_2')}{r_{вх} + R_н' + r_2'} = \frac{221\,(25 + 0{,}06)}{221 + 25 + 0{,}06} = 22{,}5 \; ом.$$

Индуктивность рассеяния обмоток

$$L_s = \frac{0{,}4\pi \cdot W_1^2 l_w}{l_s}\left(\delta_{12} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3}\right) \cdot 10^{-8} =$$

$$= \frac{0{,}4\pi \cdot 14^2 \cdot 8{,}6}{1{,}35}\left(0{,}012 + \frac{0{,}09 + 0{,}10}{3}\right) \cdot 10^{-8} = 0{,}112 \cdot 10^{-5}\ \text{гн},$$

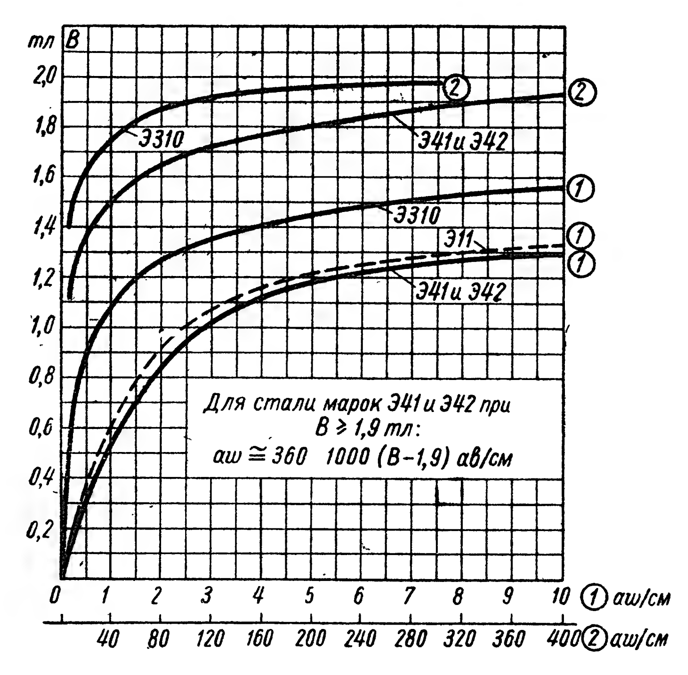


Рис. 42. Кривые намагничивания стали марок Э11, Э41, Э42 и Э310.

Распределенная емкость между обмотками

$$C_p = \frac{0{,}0885 \cdot \varepsilon\, l_w l_s}{\delta_{12}} \cdot 10^{-12} = \frac{0{,}0885 \cdot 3{,}5 \cdot 8{,}6 \cdot 1{,}35}{0{,}012} \cdot 10^{-12} =$$

$$= 3 \cdot 10^{-10}\ \text{ф}.$$

Волновое сопротивление обмоток трансформатора

$$z_T = \sqrt{\frac{L_s}{C_p}} = \sqrt{\frac{0{,}112 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-10}}} = 61\ \text{ом}.$$

Электродвижущая сила источника прямоугольных импульсов напряжения

$$E = U'_2 (1 + \gamma_R) = 500\,(1 + 1,33) = 1165\ в,$$

$$где\ U'_2 = U_2 \frac{W_1}{W_2} = 2000 \cdot \frac{14}{56} = 500\ в;$$

$$\gamma_R = \frac{R_1}{R'_2} = \frac{30,06}{22,5} = 1,33.$$

Рис. 43. Кривые намагничивания пермаллоя разных марок.

Параметр, определяющий характер переходных процессов в обмотках трансформатора,

$$\rho = \frac{1}{2\sqrt{1+\gamma_R}} \cdot \left(\frac{z_т}{R'_2} + \gamma_R \frac{R'_2}{z_т}\right) = \frac{1}{2\sqrt{1+1,33}} \times$$

$$\times \left(\frac{61}{22,5} + 1,33 \cdot \frac{22,5}{61}\right) = 1,04.$$

Так как $\rho > 1$, то в проектируемом трансформаторе переходные процессы при трансформации импульса носят апериодический характер.

Паразитная постоянная времени трансформатора

$$T_1 = \sqrt{\frac{L_s C_p}{1+\gamma_R}} = \sqrt{\frac{0{,}112 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 10^{-10}}{1+1{,}33}} = 0{,}012 \cdot 10^{-6} \textit{сек};$$

$$s_1 = \rho - \sqrt{\rho^2 - 1} = 1{,}04 - \sqrt{1{,}04^2 - 1} = 0{,}757;$$

$$s_2 = \rho + \sqrt{\rho^2 - 1} = 1{,}04 + \sqrt{1{,}04^2 - 1} = 1{,}323;$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{\sqrt{\rho^2-1}} - 1\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{1{,}04^2-1}} - 1\right) = 1{,}33;$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{\sqrt{\rho^2-1}} + 1\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{1{,}04^2-1}} + 1\right) = 2{,}33.$$

Уравнение импульса вторичного напряжения в относительных единицах

$$\frac{u_2}{U_2'} = 1 + \alpha_1 e^{-s_1\frac{t}{T_1}} - \alpha_2 e^{-s_2\frac{t}{T_1}} = 1 + 1{,}33 \cdot e^{-0{,}757\frac{t}{0{,}012 \cdot 10^{-6}}} -$$

$$- 2{,}33 \cdot e^{-1{,}323\frac{t}{0{,}012 \cdot 10^{-6}}}.$$

Так как паразитная постоянная времени трансформатора $T_1 = 0{,}012$ *мксек*, то фронт импульса равен $\tau_ф \approx 3T_1 = 3 \cdot 0{,}012 = 0{,}036$ *мксек* или составляет 3,6% от длительности импульса $\tau_и = 1$ *мксек*; следовательно, искажение трансформируемого импульса напряжения незначительно, поскольку через время $\tau_ф \approx 0{,}04$ *мксек* импульс вторичного напряжения $\frac{u_2'}{U_2'} \approx 1$.

16. Проверка трансформатора на нагревание

Открытая поверхность охлаждения сердечника трансформатора

$$S_{сер} \approx 4a_c b_c + 2b_c l_я + b_c H = 4 \cdot 1{,}1 \cdot 2{,}0 + 2 \cdot 2 \cdot 3 +$$

$$+ 2 \cdot 1{,}8 = 24{,}4 \textit{ см}^2.$$

Превышение температуры сердечника над температурой окружающей среды

$$\theta = \frac{P_{вх} + P_m}{\alpha_0 \cdot S_{сер}} = \frac{1{,}14 + 0{,}33}{14 \cdot 10^{-4} \cdot 24{,}4} = 52^\circ \text{C},$$

что вполне допустимо.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

РАЗМЕРЫ КРУГЛЫХ МЕДНЫХ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ по ГОСТ 2773—51, 6324—52, 7262—54, 7019—60, МРТУ-2—43—12—61 и МИО-003—63

Диаметр голого провода, *мм*	Сечение голого провода, *мм*²	Диаметр провода с изоляцией				
		ГОСТ 2773—51	ГОСТ 7262—54 МРТУ-2 и МИО-003	ГОСТ 6324—52		ГОСТ 7019—60
		ПЭЛ и ПЭТ	ПЭВ-2, ПЭВА, ПЭТВ и ПЭФ-2	ПЭЛШО и ПЭЛШКО	ПБД	ПЭТКСОТ
0,05	0,00196	0,065	0,08	0,12	—	—
0,06	0,00283	0,075	0,09	0,13	—	—
0,07	0,00385	0,085	0,10	0,14	—	—
0,08	0,00502	0,095	0,11	0,15	—	—
0,09	0,00686	0,105	0,12	0,16	—	—
0,10	0,00785	0,120	0,13	0,175	—	—
0,11	0,00950	0,130	0,14	0,185	—	—
0,12	0,0113	0,140	0,15	0,195	—	—
0,13	0,0132	0,150	0,16	0,205	—	—
0,14	0,0154	0,160	0,17	0,215	—	—
0,15	0,0176	0,170	0,19	0,225	—	—
0,16	0,0201	0,180	0,20	0,235	—	—
0,17	0,0227	0,190	0,21	0,245	—	—
0,18	0,0254	0,200	0,22	0,255	—	—
0,19	0,0283	0,210	0,23	0,265	—	—
0,20	0,0314	0,225	0,24	0,290	0,39	—
0,21	0,0346	0,235	0,25	0,300	0,40	—
0,23	0,0415	0,255	0,28	0,320	0,42	—
0,25	0,0440	0,275	0,30	0,340	0,44	—
0,27	0,0572	0,305	0,32	0,370	0,49	—
0,29	0,0660	0,325	0,34	0,390	0,51	—
0,31	0,0754	0,350	0,36	0,415	0,53	—
0,33	0,0855	0,370	0,38	0,435	0,55	0,47
0,35	0,0962	0,390	0,41	0,455	0,57	0,49
0,38	0,113	0,420	0,44	0,490	0,60	0,52
0,41	0,132	0,450	0,47	0,520	0,63	0,55
0,44	0,152	0,485	0,50	0,550	0,66	0,58
0,47	0,173	0,515	0,53	0,580	0,69	0,61

Диаметр голого провода, *мм*	Сечение голого провода, мм²	Диаметр провода с изоляцией: ГОСТ 2773—51, ПЭЛ и ПЭТ	ГОСТ 7262—54 МРТУ-2 и МИО-003, ПЭВ-2, ПЭВА, ПЭТВ и ПЭФ-2	ГОСТ 6324—62, ПЭЛШО и ПЭЛШКО	ГОСТ 6324—62, ПБД	ГОСТ 7019—60, ПЭТКСОТ
0,49	0,188	0,535	0,55	0,600	0,71	0,63
0,51	0,204	0,560	0,58	0,625	0,73	0,65
0,53	0,220	0,580	0,60	0,645	0,75	0,67
0,55	0,237	0,600	0,62	0,665	0,77	0,69
0,57	0,255	0,620	0,64	0,685	0,79	0,71
0,59	0,273	0,640	0,66	0,705	0,81	0,73
0,62	0,301	0,670	0,70	0,735	0,84	0,76
0,64	0,321	0,690	0,72	0,755	0,86	0,78
0,67	0,353	0,720	0,75	0,785	0,89	0,81
0,69	0,374	0,740	0,77	0,805	0,91	0,83
0,72	0,407	0,780	0,80	0,845	0,94	0,87
0,74	0,430	0,800	0,83	0,865	0,96	0,89
0,77	0,466	0,830	0,86	0,895	0,99	0,92
0,80	0,503	0,860	0,89	0,925	1,02	0,95
0,83	0,541	0,890	0,92	0,955	1,05	0,98
0,86	0,581	0,920	0,95	0,985	1,08	1,01
0,90	0,636	0,960	0,99	1,025	1,12	1,06
0,93	0,679	0,990	1,02	1,055	1,15	—
0,96	0,724	1,020	1,05	1,085	1,18	—
1,00	0,785	1,070	1,11	1,135	1,27	—
1,04	0,850	1,115	1,15	1,175	1,31	—
1,08	0,916	1,155	1,19	1,215	1,35	—
1,12	0,985	1,195	1,23	1,255	1,39	—
1,16	1,057	1,235	1,27	1,295	1,43	—
1,20	1,130	1,280	1,31	1,335	1,47	—
1,25	1,210	1,330	1,36	1,385	1,52	—
1,30	1,330	1,380	1,41	1,435	1,57	—
1,35	1,430	1,430	1,46	1,485	1,62	—
1,40	1,540	1,480	1,51	1,535	1,67	—
1,45	1,650	1,530	1,56	1,585	1,72	—
1,50	1,770	1,580	1,61	1,655	1,77	—
1,56	1,91	1,640	1,67	1,715	1,83	—
1,62	2,06	1,700	1,73	1,755	1,89	—
1,68	2,21	1,760	1,79	1,835	1,95	—
1,74	2,37	1,820	1,85	1,895	2,01	—
1,81	2,57	1,890	1,93	1,965	2,08	—
1,88	2,77	1,960	2,00	2,035	2,15	—
1,95	2,99	2,030	2,07	2,105	2,22	—
2,02	3,20	2,100	2,14	2,175	2,29	—
2,10	3,46	2,180	2,23	2,255	2,37	—
2,26	4,02	2,340	2,39	2,415	2,53	—
2,44	4,65	2,520	2,57	2,595	2,71	—

БРОНЕВЫЕ СЕРДЕЧНИКИ Ш ИЗ ШТАМПОВАННЫХ ПЛАСТИН ПО НОРМАЛИ СТ-360А

Тип сердечника	Размеры сердечника, *мм*				
	a	*b*	*c*	*H*	Ширина ярем
Ш-10×10 Ш-10×15 Ш-10×20	10	10 15 20	5	15	5
Ш-12×12 Ш-12×18 Ш-12×24	12	12 18 24	6	18	6
Ш-14×14 Ш-14×21 Ш-14×28	14	14 21 28	7	21	7
Ш-16×16 Ш-16×24 Ш-16×32	16	16 24 32	8	24	8
Ш-18×18 Ш-18×27 Ш-18×36	18	18 27 36	9	27	9
Ш-20×20 Ш-20×30 Ш-20×40	20	20 30 40	10	30	10
Ш-24×24 Ш-24×36 Ш-24×48	24	24 36 48	12	36	12
Ш-30×30 Ш-30×45 Ш-30×60	30	30 45 60	15	45	15
Ш-40×40 Ш-40×60 Ш-40×80	40	40 60 80	20	60	20

ПРИЛОЖЕНИЕ III

БРОНЕВЫЕ СЕРДЕЧНИКИ Ш ИЗ ШТАМПОВАННЫХ ПЛАСТИН ПО НОРМАЛИ НО.666.000

Тип сердечника	Размеры сердечника, *мм*				
	a	*b*	*c*	*H*	Ширина ярем
Ш-12×12	12	12	12	18	6
Ш-12×16		16			
Ш-12×20		20			
Ш-12×25		25			
Ш-16×16	16	16	16	24	8
Ш-16×20		20			
Ш-16×25		25			
Ш-16×32		32			
Ш-20×20	20	20	20	30	10
Ш-20×25		25			
Ш-20×32		32			
Ш-20×40		40			
Ш-25×25	25	25	25	37,5	12,5
Ш-25×32		38			
Ш-25×40		40			
Ш-25×50		50			
Ш-32×32	32	32	32	48	16
Ш-32×40		40			
Ш-32×50		50			
Ш-32×64		64			
Ш-40×40	40	40	40	60	20
Ш-40×50		50			
Ш-40×64		64			
Ш-40×80		80			

БРОНЕВЫЕ СЕРДЕЧНИКИ ШУ ИЗ ШТАМПОВАННЫХ ПЛАСТИН С УШИРЕННЫМ ЯРМОМ ПО НОРМАЛИ Н0.010.005

Тип сердечника	Размеры сердечника, *мм*				
	a	*b*	*c*	*H*	Ширина ярем
ШУ-10×10 ШУ-10×15 ШУ-10×20	10	10 15 20	6,5	18	6,5
ШУ-12×12 ШУ-12×18 ШУ-12×24	12	12 18 24	8	22	8
ШУ-14×14 ШУ-14×21 ШУ-14×28	14	14 21 28	9	25	9
ШУ-16×16 ШУ-16×24 ШУ-16×32	16	16 24 32	10	28	10
ШУ-19×19 ШУ-19×28 ШУ-19×38	19	19 28 38	12	33,5	12
ШУ-22×22 ШУ-22×33 ШУ-22×44	22	22 33 44	14	39	14
ШУ-26×26 ШУ-26×39 ШУ-26×52	26	26 39 52	17	47	17
ШУ-30×30 ШУ-30×45 ШУ-30×60	30	30 45 60	19	53	19
ШУ-35×35 ШУ-35×52 ШУ-35×70	35	35 52 70	22	61,5	22

ПРИЛОЖЕНИЕ V

СТАЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ТОНКОЛИСТОВАЯ ГОСТ 802—58

Марки стали

Листовая электротехническая сталь по степени легирования ее кремнием, магнитным и электрическим свойствам подразделяется на следующие марки:

Э11, Э12
Э21, Э22
Э31, Э34, Э310, Э320, Э330, Э340, Э370
Э41, Э42, Э43, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48.

Буквы и цифры в марках электротехнической стали условно обозначают:

Э — электротехническая сталь;

первая цифра (1, 2, 3, 4) — степень легирования кремнием:

1 — слаболегированная сталь;
2 — среднелегированная сталь;
3 — повышеннолегированная сталь;
4 — высоколегированная сталь;

вторая цифра (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) — гарантированные электромагнитные свойства стали:

1, 2, 3 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 50 *гц* и магнитная индукция в сильных полях;

4 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 400 *гц* и магнитная индукция в средних полях;

5, 6 — магнитная проницаемость в слабых полях (от 0,002 до 0,008 *а/см*);

7, 8 — магнитная проницаемость в средних полях (0,03 до 10 *а/см*);

третья цифра (0) обозначает, что сталь холоднокатаная.

Толщина и размеры листов стали

Марки стали	Толщина, *мм*	Ширина, *мм*	Длина, *мм*
Э11, Э12, Э21, Э22, Э31, Э32, Э41, Э42, Э43, Э44, Э310, Э320, Э330	0,5	600 ÷ 1000	1200 ÷ 2000
Э310, Э320, Э330, Э31, Э32, Э41, Э42, Э43, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48	0,35	240 ÷ 1000	1500 ÷ 2000
Э380, Э370, Э340, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48	0,20	240 ÷ 750	720 ÷ 1500
Э44	0,10	700	720

Магнитные свойства и удельные потери некоторых марок стали (таблицы I и II)

Таблица I

Марка стали	Толщина, *мм*	Магнитная индукция в теслах при напряженности магнитного поля, *ав/см*					Удельные потери, *вт/кг*		
		B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}	$p_{1,0/50}$	$p_{1,5/50}$	$p_{1,7/50}$
		не менее					не более		
Э11	0,5	—	1,50	1,62	1,75	1,97	3,30	7,90	—
Э12	0,5	—	1,49	1,61	1,74	1,96	2,80	6,80	—
Э31	0,5	—	1,46	1,57	1,70	1,90	2,00	4,50	—
Э31	0,35	—	1,46	1,57	1,70	1,90	1,60	3,60	—
Э41	0,5	1,30	1,45	1,56	1,68	1,88	1,60	3,60	—
Э41	0,35	1,30	1,45	1,56	1,68	1,88	1,35	3,20	—
Э42	0,5	1,29	1,44	1,55	1,66	1,87	1,40	3,20	—
Э42	0,35	1,29	1,44	1,55	1,66	1,87	1,20	2,80	—
Э310	0,5	1,57	1,70	1,80	1,90	1,98	1,25	2,80	3,80
Э310	0,35	1,57	1,70	1,80	1,90	1,98	1,00	2,20	3,20

Таблица II

Марка стали	Толщина, *мм*	Магнитная индукция в теслах при напряженности магнитного поля, *ав/см*			Удельные потери, *вт/кг*	
		B_5	B_{10}	B_{25}	$p_{0.75/400}$	$p_{1,0/400}$
		не менее			не более	
Э340	0,35	1,46	1,57	1,70	12,0	21,0
Э340	0,20	1,40	1,55	1,67	7,0	12,0
Э44	0,35	1,18	1,29	1,43	10,7	19,0
Э44	0,20	1,18	1,28	1,42	7,2	12,5
Э44	0,15	1,16	1,28	1,41	6,8	11,7
Э44	0,10	1,15	1,27	1,40	6,0	10,5

Среднее удельное электрическое сопротивление стали, *ом · мм²/м*

Э11, Э12, Э13 0,25
Э21, Э22 0,40
Э31, Э32, Э310, Э320, Э330, Э340 0,50
Э41, Э42, Э43, Э44 0,60

ЛАКОТКАНЬ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННАЯ ГОСТ 2214—66

Марки лакоткани

Хлопчатобумажная: ЛХ1 — нормальная, с повышенными диэлектрическими свойствами, ЛХ2 — нормальная, ЛХМ — маслостойкая, ЛХС — специальная.

Шелковая: ЛШ1 — нормальная, с повышенными диэлектрическими свойствами, ЛШ2 — нормальная, ЛШС — специальная, с повышенными диэлектрическими свойствами, ЛШС2 — специальная, ЛШС — специальная, тонкая.

Технические условия:

1. Ширина лакоткани — от 700 до 1000 *мм*
2. Толщина лакоткани, *мм*

ЛХ1 . . . . 0,15; 0,17; 0,20; 0,24
ЛХ2 . . . . 0,15; 0,17; 0,20; 0,24; 0,30
ЛХМ 0,17; 0,20; 0,24
ЛХС 0,17; 0,20
ЛШ1 . . . . 0,10; 0,15
ЛШ2 . . . . 0,08; 0,10; 0,12; 0,15
ЛШС1 0,12
ЛШС2 0,12
ЛШС . . . . 0,04; 0,05; 0,06.

3. Пробивное напряжение лакоткани при температуре 20 ± 5°С должно быть не менее указанного в табл. I.

Таблица I

Марка лакоткани	Толщина, *мм*	Среднее пробивное напряжение после выдержки в течение 18 *ч* при температуре 20 ± 5° С и относительной влажности воздуха 65 ± 5% $U_{эф}$, *кв*	Марка лакоткани	Толщина, *мм*	Среднее пробивное напряжение после выдержки в течение 18 *ч* при температуре 20 ± 5° С и относительной влажности воздуха 65 ± 5% $U_{эф}$, *кв*
ЛХ1	0,15 0,17 0,20 0,24	4,2 4,8 5,6 6,7	ЛХМ	0,17 0,20 0,24	5,1 6,1 7,7
ЛХ2	0,15 0,17 0,20 0,24 0,30	3,3 3,7 4,4 5,2 5,6	ЛХС	0,17 0,20	4,7 5,0
ЛШ1	0,10 0,15	5,0 7,5	ЛШС	0,04 0,05 0,06	0,3 1,0 2,0
ЛШ2	0,08 0,10 0,12 0,15	2,7 3,6 4,3 5,4	ЛШС1	0,12	7,6
			ЛШС2	0,12	6,5

КАРТОН ИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАРКИ ЭВ ГОСТ 2824—60

Технические показатели электрокартона

Названия показателей	Нормы
а) Толщина, *мм*	0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,5; 3
б) Объемная масса при 10% влажности в *г/см*^{3} для картона толщиной	
от 0,1 до 0,5 *мм*	1,15
от 1 до 1,5 *мм*	1,00
от 1,75 до 3 *мм*	0,95
в) Пробивная напряженность $U_{эф}$ *кв/мм* для картона толщиной	
от 0,1 до 0,3 *мм*	11
от 0,4 до 0,5 *мм*	10
от 1 до 2 *мм*	8
от 2,5 до 3 *мм*	7,5
г) Пробивная напряженность после одного перегиба в продольном направлении $U_{эф}$, *кв/мм* для картона толщиной	
от 0,1 до 0,3 *мм*	6
от 0,4 до 0,5 *мм*	5

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Видмар. Трансформаторы. ГОНТИ, 1931.
2. Д. В. Васильев. Расчет трансформаторов. Изд. ЛПИ, 1933
3. Н. П. Ермолин. Пиковый трансформатор. Известия ЛЭТИ, выпуск XXI, 1939.
4. Я. С. Ицхоки. Импульсная техника. Изд. «Советское радио», 1949.
5. Г. С. Цыкин. Трансформаторы низкой частоты. Связьиздат, 1955.
6. Н. П. Ермолин, А. П. Ваганов. Расчет маломощных трансформаторов. Госэнергоиздат, 1957.
7. Р. Х. Бальян. Трансформаторы малой мощности. Судпромгиз, 1961.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Ермолин Николай Пантелеймонович

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Научный редактор *Ю. А. Бычков*
Художественный редактор *Г. А. Гудков*
Технический редактор *Е. М. Соболева*
Корректор *В. Н. Миханкова*

Сдано в производство 6/VI 1969 г Подписано к печати 11/IX 1969 г. М-50780. Печ. л. прив. 10,08. Уч.-изд. л. 8,1. Бум. л. 3. Формат $84\times108^1/_{32}$. Бумага типографская №2
Тираж 35 000 экз. Заказ № 570. Цена 41 к.

Ленинградское отделение
издательства «Энергия»
Марсово поле, 1.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, г. Ленинград, Гатчинская ул., 26.

Цена 41 коп.

